

**METODOLOGÍA PARA LA INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA A
PARTIR DE SÍSMICA 3D Y REGISTROS DE POZOS**

LEONARDO FABIO GUERRA GUERRA

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
SOGAMOSO, BOYACÁ
2013**

**METODOLOGÍA PARA LA INTERPRETACIÓN ESTRATIGRÁFICA A
PARTIR DE SÍSMICA 3D Y REGISTROS DE POZOS**

LEONARDO FABIO GUERRA GUERRA

**Trabajo de Tesis Realizado como Requisito Para Optar al Título de
Ingeniero Geólogo**

Directores:

Ing. Geol. Carlos Julio Rodríguez

UPTC

Co-Director

Ing. Geol. Andrés Vargas Viasús

PETRALOG

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
SOGAMOSO, BOYACÁ
2013**

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma Del Jurado 1

Firma Del Jurado 2

Sogamoso Noviembre, 2014

DEDICATORIA

A Dios

A mis dos madres

A mi vieja Eva Hernández Payares (Q.E.P.D)

AGRADECIMIENTOS

A toda la gracia de Dios, sin él nada es posible.

A la prestigiosa UPTC seccional Sogamoso, porque más que mi casa de estudio fue escenario de innumerables momentos inolvidables, que me hicieron crecer tanto académicamente como personalmente.

Al Ingeniero Carlos Julio Rodríguez, por aceptar dirigirme

A mis profes Mercedes Pérez y Nebardo Abril, que tal vez sin saber me enseñaron el valor de la humildad

Al Ingeniero German Herrera (el mago) por aguantarme siempre

Al Ingeniero Rafael Pérez, profesor y amigo

A mis madres, Elizabeth, Sonia y María Stella Guerra por siempre estar para mí cuando las necesite

A el ingeniero Huber Rivera por ser más que un amigo, por siempre estar a pesar de las adversidades, por decirme no, cuando me lo merecía pero siempre estar ahí para no dejarme caer, para no dejarme desfallecer, para darme la mano.

A mi combo, por aceptarme como soy y por siempre estar ahí, por ser mi familia, Taimir carrillo (mi hijo bobo), Taimis Carrillo, Nesyereb Suarez, Katherine Sánchez (**miqui de lagrimales incansables**), Maira Sánchez (**la mujer más temúa del mundo y la niña de mis ojos**), Carlos Martínez (**Minimí, Pate E Guama, Master Of Master, El Mejor**), Rajeth Castro (**Tejedor, El Curí Castro**), Leiner aponte (**Tao, Tao**), Luisfer Ortiz (**mi negra**). Para todos amistad y corazón para siempre, y como diría Wama para “mis número dos” también mi cariño por haber hecho parte de lo bueno.

CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCION	12
1. GENERALIDADES	14
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	14
1.3. LOCALIZACIÓN	15
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	16
1.5. ESTUDIOS ANTERIORES	17
2. CONTEXTO GEOLOGICO Y ESTRUCTURAL	19
2.1. MARCO GEOLOGICO REGIONAL	19
2.1.1. Estratigrafía.....	19
2.2. MARCO TECTONO-SEDIMENTOLOGICO	40
2.2.1. Tectónica Regional.....	40
2.2.2. Evolución Tectónica.....	40
3. METODO EXPERIMENTAL	48
3.1. BASE DE DATOS.....	48
3.2. CALIBRACION SISMICA-POZO.....	52
3.2.1. Resolución de los datos sísmicos	52
3.3. SISMOGRAMA SINTÉTICO	53
3.4. ELECTROFACIES.....	56
3.5. GEOMETRÍAS ESTRATALES Y FACIES SÍSMICAS	58
4. INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS.	62
4.1. INTERPRETACIÓN DE ELECTROFACIES Y AMBIENTES DE DEPÓSITOS. 62	
4.1.1. Ambiente Marino Somero	63
4.1.4. Ambiente de Plataforma Externa (Nerítico Exterior).....	67
4.2. INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS ESTRATIGRÁFICAS	70
4.2.1. Secuencia 1.....	72
4.2.2. Secuencia 2.....	73

4.2.3. Secuencia 3.....	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFIA.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 . Muestra la imagen de la localización geográfica del área de estudio, adicionalmente se muestra una parte de la faja sísmica del bloque	15
Figura 2. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Sleen	20
Figura 3. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Aalborg	22
Figura 4. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Graben Inferior.....	24
Figura 5. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Graben Central.....	26
Figura 6. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Graben superior.....	27
Figura 7. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Arcillas del kimmeridge.....	29
Figura 8. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Arenas Verdes del Scruff	30
Figura 9. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Clay Deep.....	32
Figura 10. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Areniscas de Vieland	34
Figura 11. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Arcillas de Vieland	35

Figura 12. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Holanda.....	37
Figura 13. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Chalk.	38
Figura 14. Columna estratigráfica regional de los Grupos y Formaciones depositados en la cuenca del mar del norte antes, durante y después del rift que dio su origen.	39
Figura 15. Una visión general de la zona del Mar del Norte y la región del Atlántico Norte adyacente durante el Paleozoico (izquierda) y Post Mesozoico (derecha). La complejidad tectónica de esta zona se hace muy clara en esta imagen como tres cinturones plegados.....	40
Figura 16. Configuración geográfica en los periodos comprendidos desde el cámbrico al devónico de la actual ubicación de la cuenca del Mar del Norte.....	41
Figura 17. Formación de las cadenas caledónicas.....	42
Figura 18. Súper-continente Pangea, configuración geográfica después de la orogenia hersinica.	42
Figura 19. Formación de las cadenas Hersinica o varicana	43
Figura 20. Fracturamiento del Súper-continente Pangea, el punto rojo hace alusión a lo que hoy es la cuenca del mar del norte	44
Figura 21. se observa la continuación de rift y la deriva de los continentes hasta su posición actual	45
Figura 22. Curva tiempo profundidad para el pozo f03-01.....	50
Figura 23. MAPA DE LA ZONA. Se muestra el área del bloque F3 de la cuenca del mar del norte, que se encuentra cubierto por la sísmica (fondo verde) y los respectivos pozos, ubicados dentro y fuera del área que fueron utilizados en el procesamiento, de acuerdo a la información que cada uno poseía.....	51
Figura 24. Espectro de Amplitud y frecuencias del cubo sísmico utilizado. Se observa el rango de frecuencias dominantes entre los 7 Hz y 65 Hz.....	53
Figura 25. Sismograma sintético del pozo F03-04.	54
Figura 26. Calibracion del sintetico (en rojo) y la sísmica. Factor de correlación 0.812	55
Figura 27. En el diagrama se muestra el rango de manera general de las posibles respuestas en los registros GR y SP. Cada curva representa una "electrofacies" dependiendo directamente de la clasificación de las formas de dicha curva.	57
Figura 28. Muestra del resultado que arrojo el modelamiento de electrofacies en el software.....	58
Figura 29. Se muestran los patrones encontrados en la sísmica	59
Figura 30. Geometrías estratales y sus terminaciones.....	60
Figura 31. Patrones de reflexión que definen las facies sísmicas. A) Clinoformas B) patrones de reflexión.	60

Figura 32. Distribución general de las electrofacies y su asociación con las Unidades Litológicas y su respectivo ambiente.....	63
Figura 33. Relación del ambiente depositado y la formación a la que se asocia. Para esto se utilizó la imagen del bloque diagrama que representa el ambiente sedimentario.....	63
Figura 34. Relación del ambiente depositado y la formación a la que se asocia. Para el caso se trata de un ambiente sedimentario marino profundo, el cual se asocia con las formaciones Holanda y Arcillas de Vieland respectivamente.	65
Figura 35. La figura muestra el resultado de la interpretación, de un ambiente turbidítico, el cual es asociado con la formación Areniscas de Vieland.....	66
Figura 36. La figura muestra el resultado de la interpretación, de un ambiente turbidítico, el cual es asociado con la formación Clay Deep	67
Figura 37. Interpretación de electro facies. Para este fin se utilizaron los pozos con mayor información, se muestra la correlación de los ambientes mencionados anteriormente.....	69
Figura 38. Mapa Isópaco de la base del grupo Chalk.....	70
Figura 39. Interpretación de terminaciones estratales para la definición de secuencias estratigráficas.....	71
Figura 40. Secuencias interpretadas con sus respectivos System Tracts.	72
Figura 41. Secuencia 1 con sus respectivos System Tracts interpretados.	73
Figura 42. Secuencia 2 con sus respectivos System Tracts interpretados.	74
Figura 43. Secuencia 3 con sus respectivos System Tracts interpretados.	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Sleen	19
Tabla 2. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Aalborg.....	21
Tabla 3. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Graben Inferior.....	23
Tabla 4. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Graben Central	25
Tabla 5. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Graben Superior...	26
Tabla 6. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Arcillas del Kimmeridge	28

Tabla 7. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Arenas verdes del Scruff	29
Tabla 8. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Deep (Arcillas profundas)	31
Tabla 9. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Areniscas de Vieland	33
Tabla 10. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Arcillas de Vieland	34
Tabla 11. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Holanda	36
Tabla 12. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Chalk	37
Tabla 13. Descripción compilada de la sísmica.....	48
Tabla 14. Descripción detallada de los datos disponibles.	48
Tabla 15. Relación de los pozos con su registro y la profundidad de los datos disponibles.....	49

RESUMEN

Este estudio tiene como propósito orientar de una manera sencilla en cuanto a comprensión, el manejo del software KINGDOM SUITE en su versión 8.6 haciendo referencia exclusivamente a la interpretación de registros de pozos y sísmica 3D para obtener una idea clara sobre los conceptos estratigráficos.

La interpretación sismo-estratigráfica es una técnica que se generó producto de la fusión de técnicas geológicas y geofísicas, dos ciencias complementarias pero que se aplicaban en forma individual.

Este trabajo está dotado de conceptos útiles referente al cumplimiento del objetivo general del mismo, además cuenta con una estructura sólida de la forma de presentación de trabajos de este tipo. Sin embargo cabe resaltar que también se encuentra limitado por la falta de información propia de un estudio completo.

INTRODUCCION

El análisis e integración de la información geológica de una cuenca sedimentaria permite determinar la relación existente entre los ambientes de depositación y los procesos estructurales que influyeron en su desarrollo.

Este proceso ha sido de gran utilidad para la industria del petróleo, porque le ha permitido innovar en nuevas técnicas que han colaborado en el desarrollo más eficiente de ciertas tareas que anteriormente eran impedimentos para el avance eficaz de todo el sistema de producción. Por esta razón ha fusionado técnicas de dos ciencias que a pesar de ser complementarias (geología y geofísica), se desarrollaban en forma individual.

La interpretación sismo-estratigráfica es una técnica producto de esa fusión anteriormente mencionada. Originalmente fue desarrollada para predecir nuevas reservas de hidrocarburos, no solo se basa en las correlaciones de roca empleando litología, fósiles y otras técnicas estratigráficas o el análisis de facies para reconstrucciones de ambientes del pasado, cambios relativos del nivel del mar lo que implica cambios en el aporte de sedimentos; sino que combina las dos aproximaciones y reconoce paquetes de estratos, cada uno de los cuáles fue depositado durante un ciclo de cambios relativos del nivel del mar lo que implica cambios en el aporte de sedimentos.

La naturaleza predictiva del modelo de las secuencias estratigráficas es una ayuda para la integración y correlación de una variedad de ambientes sedimentarios en diversas localidades.

Para sintetizar estos datos, se han desarrollado un sin número de softwares, que permiten minimizar el tiempo de análisis de los mismos. El avance en estas técnicas exploratorias, traducidas en desarrollo de estos softwares ha permitido llegar a delimitaciones más certeras, en cuanto a los yacimientos de hidrocarburos, reduciendo la incertidumbre y los costos de producción, comparado con sus inicios.

Este trabajo tiene como finalidad, utilizar estas nuevas tecnologías para aplicar una metodología que permita la interpretación estratigráfica a partir de registros de pozos y sísmica 3D del bloque F3 de la cuenca del mar del norte (offshore) ubicado al noroeste de Holanda, con lo cual se

pretende determinar las secuencias estratigráficas, para especificar las características litológicas en las formaciones y cuáles de ellas probablemente contienen hidrocarburos.

1. GENERALIDADES

1.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar una metodología para la interpretación estratigráfica a partir de registros de pozos y una faja sísmica utilizando el software THE KINGDOM SUITE versión 8.6, aplicándolo sobre los datos del bloque F3 de la cuenca del mar del norte (offshore), en el sector Holandés.

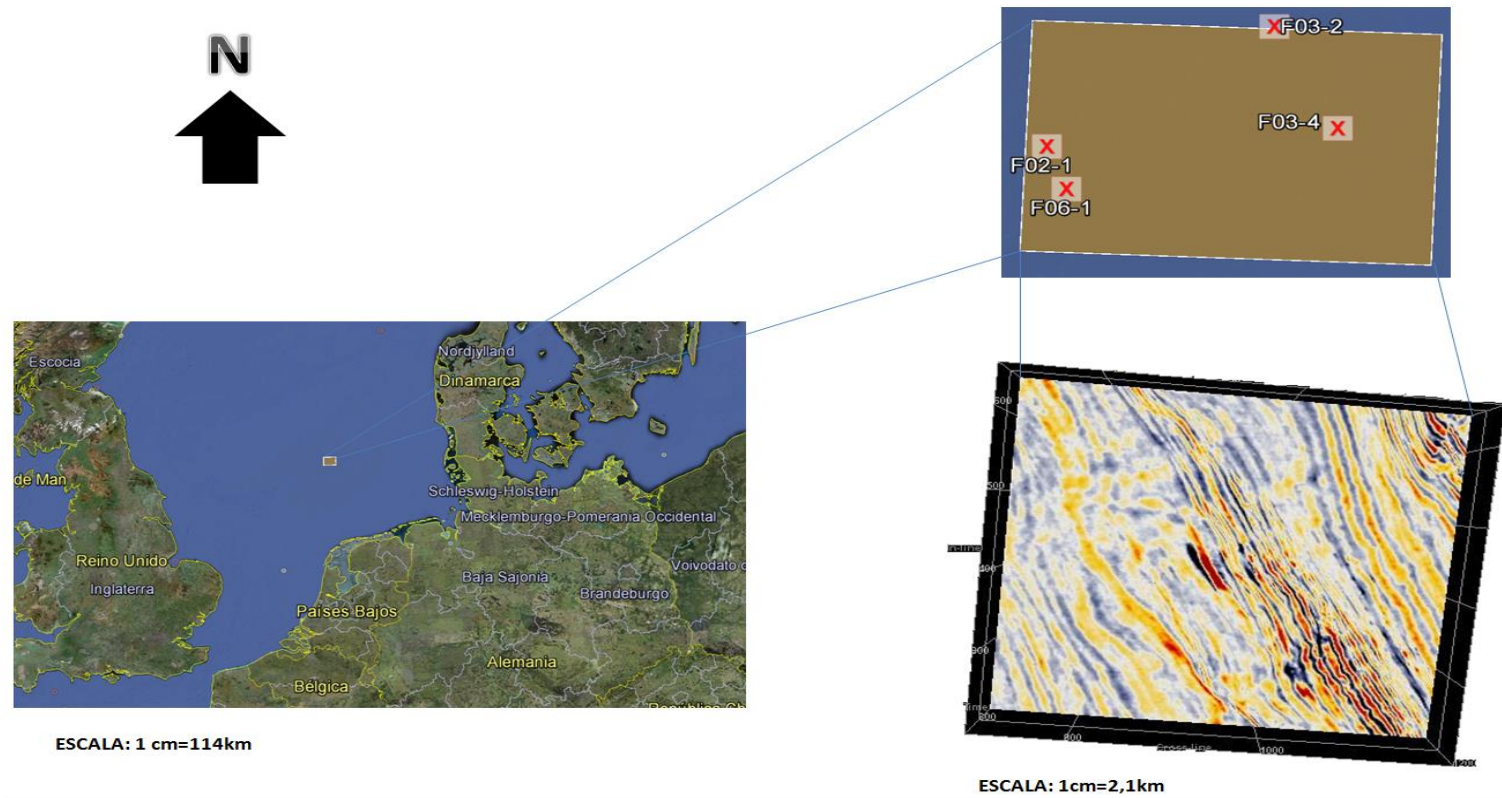
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Contribuir con la formación académica y utilización de las nuevas tecnologías.
- ✓ Mostrar la importancia del uso de software para encontrar y reconocer la ubicación de depósitos minerales o de recursos no renovables como en este caso el petróleo y gas.
- ✓ Llevar a cabo un estudio bibliográfico completo que permita tener una base sólida de la historia geológica y la actualidad no solo de la cuenca del mar del norte si no de los países bajos* y sus alrededores.
- ✓ Realizar la metodología para la estratigrafía de secuencia utilizando registros de pozos y sísmica.
- ✓ Realizar la determinación e interpretación de las geometrías estratales y facies sísmicas como parte fundamental de la metodología.
- ✓ Realizar la definición de los ambientes de depositación.
- ✓ Realizar sismogramas sintéticos.

1.3. LOCALIZACIÓN

La metodología se aplicará sobre los datos del bloque F3 en la cuenca del mar del Norte (offshore), ubicado en la parte meridional de la cuenca al NNW de los Países Bajos.

Figura 1 . Muestra la imagen de la localización geográfica del área de estudio, adicionalmente se muestra una parte de la faja sísmica del bloque



Fuente: www.opendtec.org y modificada por el autor

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

El desarrollo del proyecto consta de tres fases, las cuales se plantearon con el fin de realizar un trabajo bien estructurado, óptimo y sistemático. A continuación se presenta una breve descripción:

✓ Fase I. Recopilación Bibliográfica.

Esta fase cumple con el propósito de recopilar la información existente correspondiente a revisión bibliográfica de trabajos anteriores, con el fin de tener una concepción de las ideas de otros autores en el tema, también la recopilación de información existente relacionada con la historia geológica, tectónica y sedimentación de la cuenca que se va a trabajar. Esta fase culmina con la preparación de la fase de modelamiento.

✓ Fase II. Modelamiento de los datos en el software Kingdom Suit.

Luego de terminada la fase previa, se inicia con un reconocimiento del software, se plantea la metodología a utilizar para el desarrollo de esta etapa, se ingresan los datos al software y se procede con el análisis y la interpretación de los resultados, arrojados por el mismo, luego de terminada esta fase, se procede con la etapa final.

✓ Fase III. Trabajo de Oficina.

En esta fase se integra la información obtenida en la fase previa, luego de ser analizada e interpretada se plasma y se redacta el informe final.

1.5. ESTUDIOS ANTERIORES

La cuenca del mar del norte ha sido estudiada desde hace varias décadas, las interpretaciones sísmicas han sido multiplicadas en esta última década cuando los datos fueron publicados en la web sin ninguna clase de restricción.

Roy H. Gabrielsen - Rune Kyrkjebø, et al. (2001), publicaron un artículo en el boletín 137 de la AAPG denominado, "The Cretaceous post-rift basin configuration of the northern North Sea". Este artículo se enfoca en la descripción detallada de los cambios que ocurrieron en la etapa de post-rift, sugiere que el estado térmico del sistema no era homogéneo en esta etapa y la divide en 3 sub etapas, inicial, media y madura, comenzando en el Barriasiano y terminando a principios del Paleoceno. En la primera etapa se hace alusión a la acomodación de los sedimentos. A demás también hace referencia a la etapa de transición entre el syn-rift y el post-rift.

James F. Miller (2001). Realizó una Tesis para optar al título de maestría en Ciencias de la Tierra en la universidad de Brigham Young que se tituló "Facies analysis and sequence stratigraphy of hydrocarbon productive Pleistocene sand horizons using wireline logs and 3D seismic data, west Cameron south addition, offshore Louisiana". Él utilizó registros de pozos y sísmica 3d para determinar los ambientes de deposición y el marco de secuencias estratigráficas de los sedimentos del pleistoceno, realizó la comparación entre registros Gamma Ray y Potencial Espontáneo para conocer el ambiente deposicional y realizar la interpretación de las facies.

Rune Kyrkjebø, R.H. Gabrielsen and J.I. Faleide (2004), publicaron un artículo en la revista de la Sociedad Geológica de Londres llamado, "Unconformities related to the Jurassic-Cretaceous syn-rift-post-rift transition of the northern North Sea". Este artículo se centra en la etapa de transición entre el syn rift y el post rift en el norte de la cuenca del mar del norte, ubica una discordancia en el Cinmeriano tardío que separa las dos etapas, ellos llegaron a esta conclusión partiendo de estudios de reflexión sísmica, afirman que la discordancia se encuentra en toda la cuenca y es fácilmente diferenciable a nivel regional, pero si se realizan un enfoque a nivel local, la discordancia se convierte en algo más complejo y la clasifican como non-conformidad, disconformidad y discordancia angular.

Daniel Alberto Chramcow García (2008). Realizó una tesis para optar al título de Ingeniero Geofísico en la universidad Simón Bolívar, que se llamó “Interpretación sísmo-estratigráfica del área de pichincha perteneciente a la faja petrolífera del Orinoco”, En esta tesis se realizó una correlación con los datos sísmicos y los datos de pozos, lo que conllevó a la generación de mapas de velocidad y mapas estructurales que permitieron la interpretación del marco sedimentológico del área.

Tom Erik Maast, Jens Jahren And Knut Bjørlykke (2011), publicaron un artículo en la AAPG, denominado, “Diagenetic controls on reservoir quality in Middle to Upper Jurassic sandstones in the South Viking Graben, North Sea”. Este artículo evalúa la calidad de los yacimientos en el Graben Vikingo perteneciente a la Cuenca del mar del norte, para ello se basaron en una combinación de estudios petrofísicos, petrográficos y métodos de modelado de cuencas 1D y realizaron la predicción del hidrocarburo a partir de las mediciones de las porosidades.

Jerson Enrique Jiménez Eurrestra (2011). Realizó una tesis para optar al título de Ingeniero Geofísico en la universidad Simón Bolívar, que lleva por nombre “Modelo sísmico-estructural 3d de un área exploratoria perteneciente al bloque Petrogüiria, golfo paria este, edo. Sucre”. Él se basó en la interpretación sísmico-estructural 3d donde identificó 2 miembros de la formación de interés, para lo cual utilizó correlación de pozos y realizó sismogramas sintéticos.

Evelina Dmitrieva - Christopher A-L. Jackson, et al. (2012) publicaron un artículo en la revista Petroleum Geoscience titulado, “Paleocene deep-water depositional systems in the North Sea Basin: a 3D seismic and well data case study, offshore Norway”. En este artículo se basa en una interpretación sísmica 3d y que luego correlacionan con registro de pozos para calcular la geometría de los sistemas deposicionales con un alto grado de detalle con el fin de caracterizar las litologías allí presentes y delimitar reservorios de aguas profundas.

2. CONTEXTO GEOLOGICO Y ESTRUCTURAL

2.1. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

2.1.1. Estratigrafía

La estratigrafía desde el Jurásico tardío y Cretácico temprano en el Mar del Norte es mostrada en la figura 14. Las rocas más antiguas pertenecen al Grupo Altona, que se depositó durante la finalización del Triásico y alcanzo gran parte del Jurásico medio, son depósitos arcillosos predominantemente de ambientes marinos someros y continentales (NAM and RGD, 1980), y por tanto forman principalmente rocas fuente en el norte del Mar del Norte. Este grupo está compuesto por la Formación Sleen y la Formación Aalburg.

Formación Sleen

Secuencia arcillas de grises, fosilíferas, cubierta por arcillas marrones, localmente de arena (a menudo contienen una cantidad considerable de mega-esporas). En general, la Formación Sleen es fácilmente reconocible en los registros sobre líneas de cables por su espesor uniforme, relativamente alta de rayos gamma y las lecturas de velocidad acústica baja.

Tabla 1. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Sleen

Datos Generales	
Pozo	Werkendam-2
Locación	N 51°47'29.7 E 04°50'22.1
Profundidad	2803 to 2838 m
Longitud	35 m a lo largo del pozo
Referencia	NAM and RGD (1980)

Fuente: www.dinoloket.nl

La unidad se encuentra por debajo de la piedra caliza arcillosa basal que cubre la Formación Aalburg.

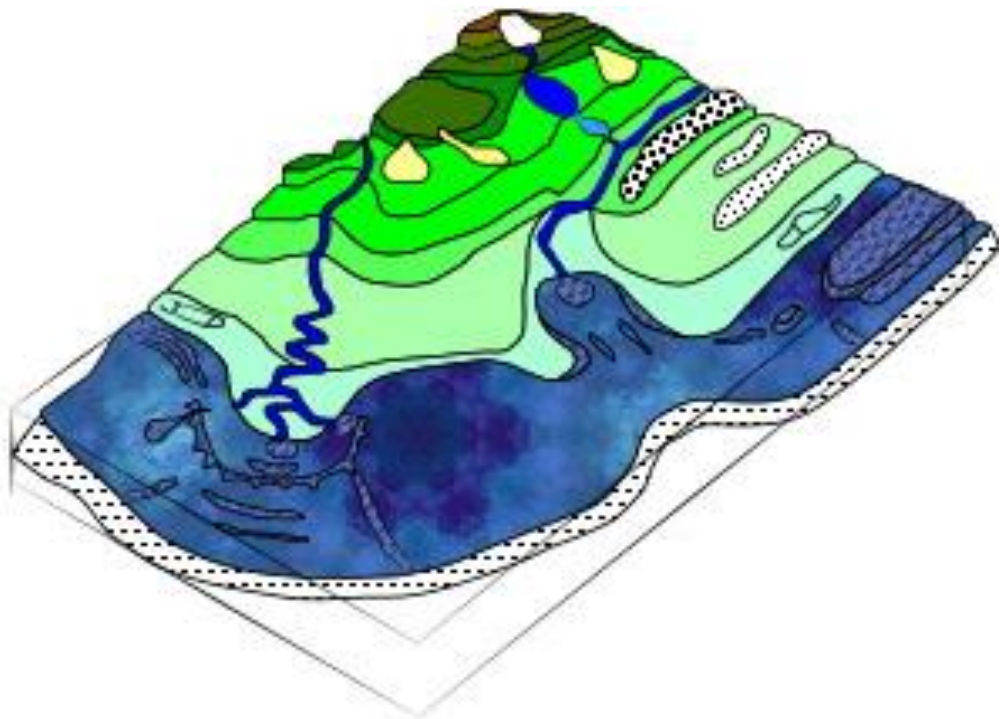
En la parte oriental de los Países Bajos la formación a nivel local se apoya de forma discordante a los miembros mas antiguos de la misma.

Ambiente depositacional

La abundancia y los tipos de fósiles encontrados en esta formación indican que la depositación se dió en un ambiente superficial, marino abierto.

El espesor uniforme es evidencia de un período de subsidencia lenta y uniforme.

Figura 2. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Sleen



Fuente: <http://sed.com.sapo.pt> y modificada por el autor

Formación Aalburg

Secuencia calcárea de color gris oscuro, localmente limoso o arenoso, arcillas que contienen capas de piedra caliza ocasional (hash fósil). Son lutitas euxínicas depositadas en condiciones anóxicas, cuya ocurrencia tuvo lugar cuando la circulación de la cuenca se estancó.

Tabla 2. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Aalborg

Datos Generales	
Pozo	Werkendam-2
Locación	N51°47'29.7 E 04°50'22.1
Profundidad	2228 to 2803 m
Longitud	575 m a lo largo del pozo
Referencia	<i>NAM and RGD (1980)</i>

Fuente: www.dinoloket.nl

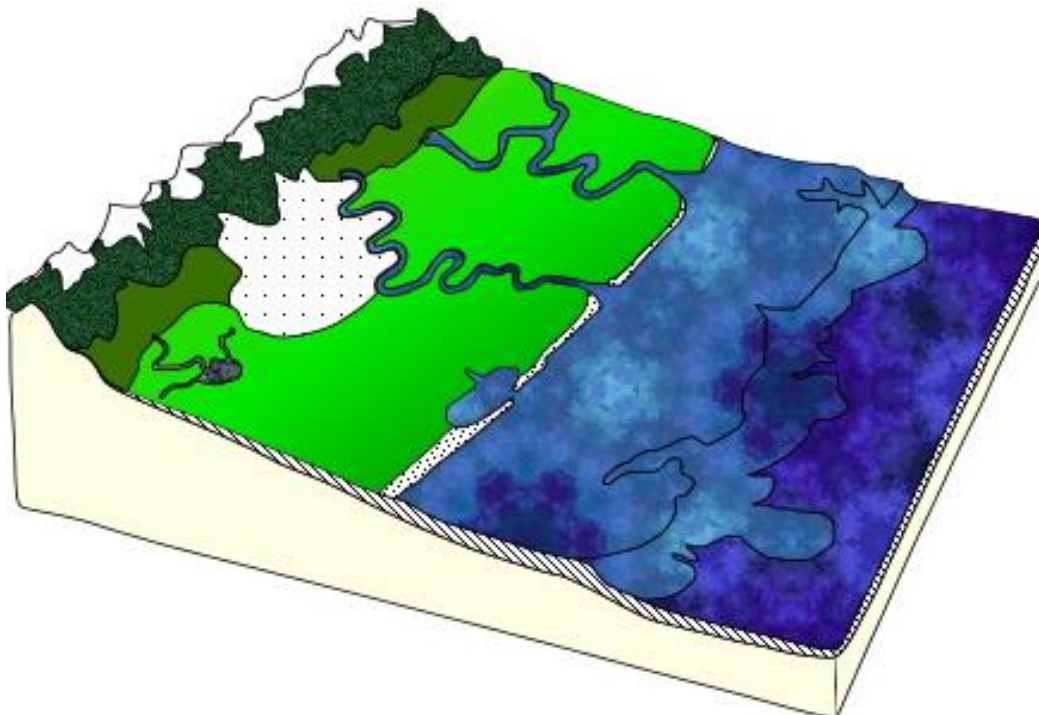
El límite superior de la Formación Aalborg está determinado concordantemente por la Formación Graben Inferior.

La formación se apoya sobre los estratos de la Formación Sleen.

Ambiente deposicional

Los fósiles y las asociaciones de litofacies encontrados en esta formación indican deposición en un mar abierto poco profundo a bastante profundo. La distribución del espesor de la formación ilustra tasas de subsidencia diferencial durante su depositación. Los datos sísmicos muestran actividad de fallas crecimiento asociado con la tectónica de extensión y adelgazamiento considerable hacia el margen cuenca sur contra el macizo de Londres-Brabant. Particularmente secuencias gruesas de esta formación se pueden encontrar en el Centro Graben holandesa, asociada a estructuras halokinetic.

Figura 3. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Aalburg



Fuente: <http://geologiavenezolana.blogspot.com> y modificado por el autor

El Grupo Graben Central agrupa las Formaciones Graben Bajo y Graben Medio respectivamente. La Formación Graben Bajo, se compone de unidades dominadas arenisca de grano fino, con una porosidad media alta y la Formación Graben Medio se compone de shale (lutitas), las dos formaciones varían su espesor considerablemente de un lugar a otro (NAM and RGD, 1980), por esta razón algunos autores no la consideran como grupo sino como subgrupo (Hengreen y Wong 1989).

Formación Graben Inferior

Sección de areniscas color marrón grisáceo, de grano fino a muy fino, bien clasificados, que se pueden observar en capas por lo general menor a 10 m de espesor, con intercalaciones de limos finos de color marrón grisáceo y arcillolitas. La formación es generalmente carbonosa con algunas capas de carbón distintos. Los cuerpos de areniscas individuales tienen una extensión lateral bastante restringida, sobre todo en las partes altas de esta unidad el patrón del registro Gamma Ray de estas capas tiende a mostrar una tendencia grano-creciente.

Tabla 3. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Graben Inferior

Datos Generales	
Pozo	F03-03
Locación	N54°50'45.5 E 04°42'29.3
Profundidad	3090 a 3652 m
Longitud	562 m solo el pozo
Referencia	<i>NAM and RGD (1980)</i>

Fuente: www.dinoloket.nl

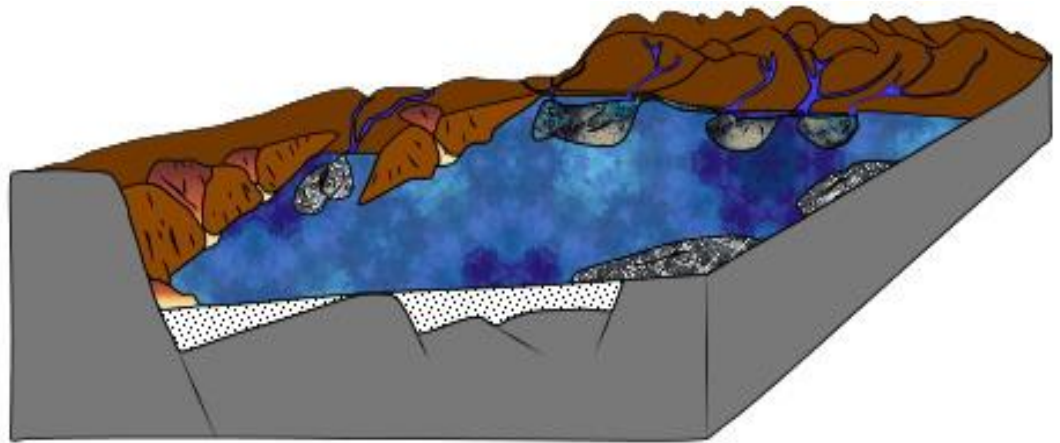
El límite superior de la Formación Graben Inferior está determinado concordantemente por la Formación Graben Central.

La formación se apoya en discordancia sobre los estratos de la Formación Werkendam, la Formación Aalburg, o el Grupo Germánico del Triásico Superior.

Ambiente de deposicional

Dado que no hay vestigios de organismos marinos en la parte inferior de la formación, se infiere un origen fluvial llano. En el transcurso del tiempo, las condiciones costeras de llanura comenzaron a prevalecer, con incursiones marinas ocasionales, como se puede deducir de la dispersa micro-fauna y los ricos conjuntos de dinoflagelados. Las secuencias grano crecientes (CUS) se interpretan como progradacionales depositados en canales deltáicos, mientras que las arcillas se establecieron en el delta-llanuras.

Figura 4. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Graben Inferior



Fuente: <http://es.slideshare.net> y modificada por el autor

Estratigrafía de secuencias

La transición a la Formación se compara con un Maximum Flooding Surface

El grupo Scruff data del Jurásico tardío, es conformado por las formaciones Graben Superior, Arcillas del Kimmeridgiano y Areniscas verdes.

Depositado en un ambiente principalmente marino somero (Herngreen y Wong, 1989). Sin embargo algunos autores afirman que la Formación Arcillas del Kimmeridgiano fue depositada en ambientes anóxicos y contiene facies hemipelágicas (Richards et al., 1993).

Formación Graben Central

Es una sección de arcillas grises, carbonosas, localmente muy limosas. En la parte norte del cuadrante F (por ejemplo, F02, F03 y F05) un solo estrato de arenisca gruesa puede intercalarse. En la parte inferior de la formación existen algunas vetas de carbón finas pero distintas. Son lateralmente muy extensas y forman importantes marcadores lito-estratigráficos.

Tabla 4. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Graben Central

Datos Generales	
Pozo	F03-03
Locación	N54°50'45.5 E 04°42'29.3
Profundidad	2670 to 3090 m
Longitud	420 m solo el pozo
Referencia	NAM and RGD (1980)

Fuente: www.dinoloket.nl

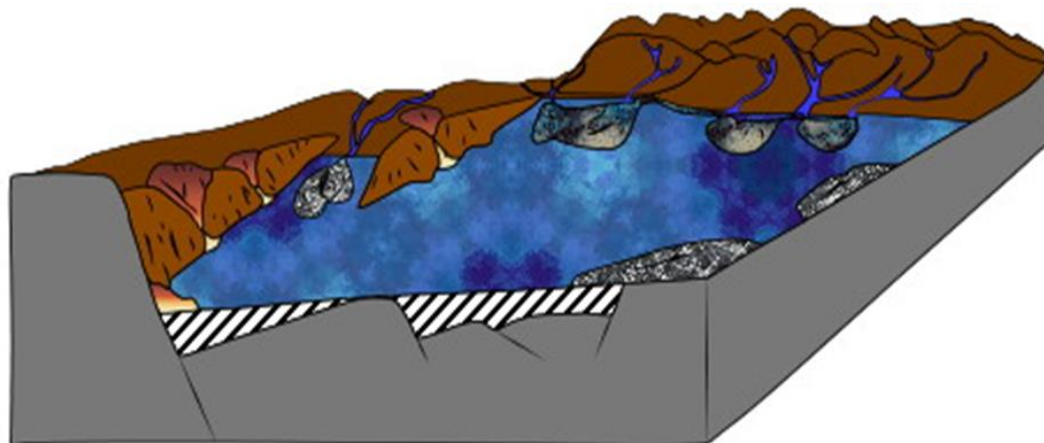
El límite superior de la formación es el contacto conforme con las finos marinos de la Formación Arcillas del Kimmeridge (F03-01) o arenas costeras de la Formación Graben superior (F03-03) en la parte norte del Graben central holandés.

El límite inferior con la formación Graben inferior, la cual se coloca en la base de la veta de carbón distinta más inferior, que cubre inmediatamente lechos de arena gruesa.

Ambiente deposicional

Partiendo la base litológica y el contenido fósil, el ambiente de deposición puede ser interpretado como predominantemente Lacustrino. Los yacimientos de carbón basales se formaron en extensos pantanos costeros. Las arcillas intercaladas muestran un marcado carácter marino, mientras que las arcillas que ocurren más alto en la sección son estrictamente de origen lacustre (algas de agua dulce *Botryococcus* dominar).

Figura 5. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Graben Central.



Fuente: <http://es.slideshare.net> y modificada por el autor

Estratigrafía de Secuencias

El Miembro Arenoso de la formación Graben Central se interpreta para representar el Late Highstand systems tract

Formación Graben Superior

Está compuesta por dos intervalos de areniscas carbonosas color marrón grisáceo, de grano fino a muy fino separado por una sección arcillo-limosa. Las dos capas de arena, pero sobre todo el lecho de arena superior, tiende a mostrar un patrón en el registro Gamma Ray en forma de embudo.

Tabla 5. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Graben Superior

Datos Generales	
Pozo	F03-03
Locación	N 54°50'45.5 E 04°42'29.3
Profundidad	2547 to 2670 m
Longitud	123 m a lo largo del pozo
Referencia	NAM and RGD (1980)

Fuente: www.dinoloket.nl

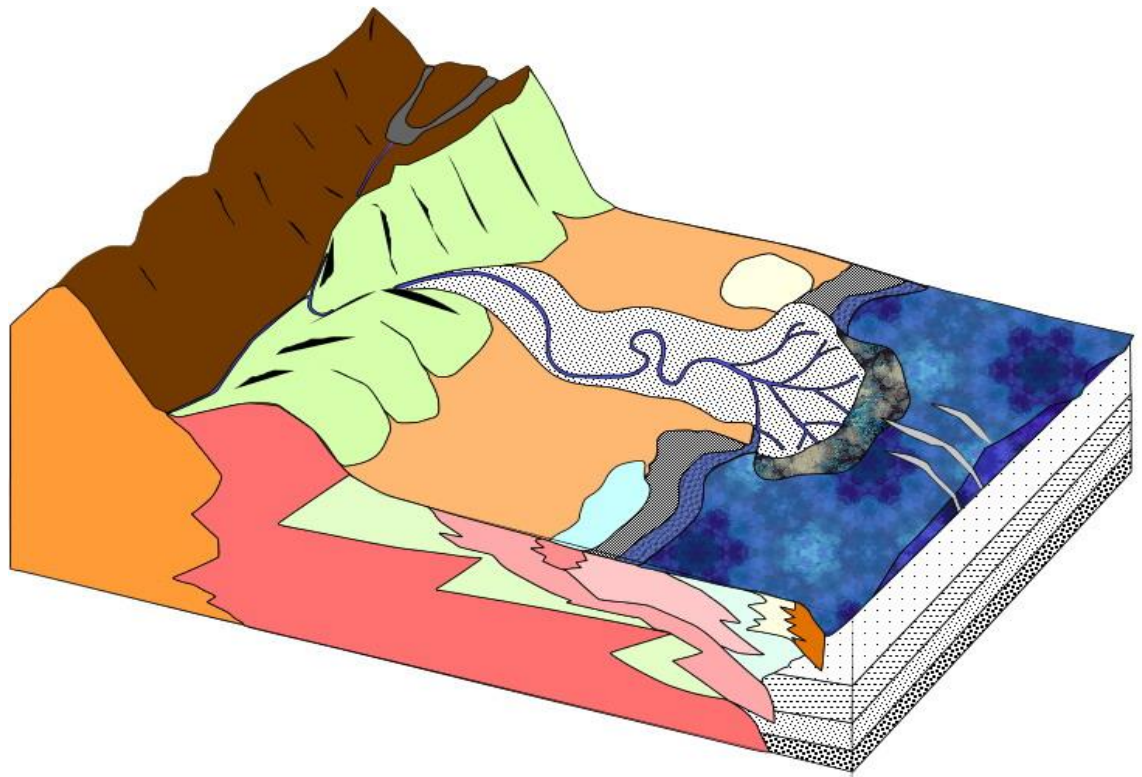
La parte superior está marcada por el contacto conformable con las lutitas marinas de la Formación Kimmeridge Clay.

En la base la formación cubre concordantemente en gran parte con la Formación Graben Central.

Ambiente deposicional

Los cuerpos arenosos de la Formación Graben Superior representan progradantes barras costeras apiladas o deltaicas (ver figura 6). Estudios de Palinofacies han sugerido que algunas de estas arenas son depósitos de tormenta.

Figura 6. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Graben superior



Fuente: es.wikiopedia.org y modificado por el autor

Estratigrafía de Secuencias.

La formación refleja, un ciclo entre Late Highstand systems tract a un early Transgressive systems tract.

Formación Arcillas del Kimmeridge

Son arcillas limosas generalmente oscuras con numerosas vetas delgadas de dolomita. En las partes superiores la formación se torna más arenosa y ligeramente bituminosa.

Tabla 6. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Arcillas del Kimmeridge

Datos Generales	
Pozo	F03-03
Locación	N54°50'45.5 E 04°42'29.3
Profundidad	1780 to 2547 m
Longitud	767 m a lo largo del pozo
Referencia	<i>Herngreen and Wong (1989)</i>

Fuente: www.dinoloket.nl

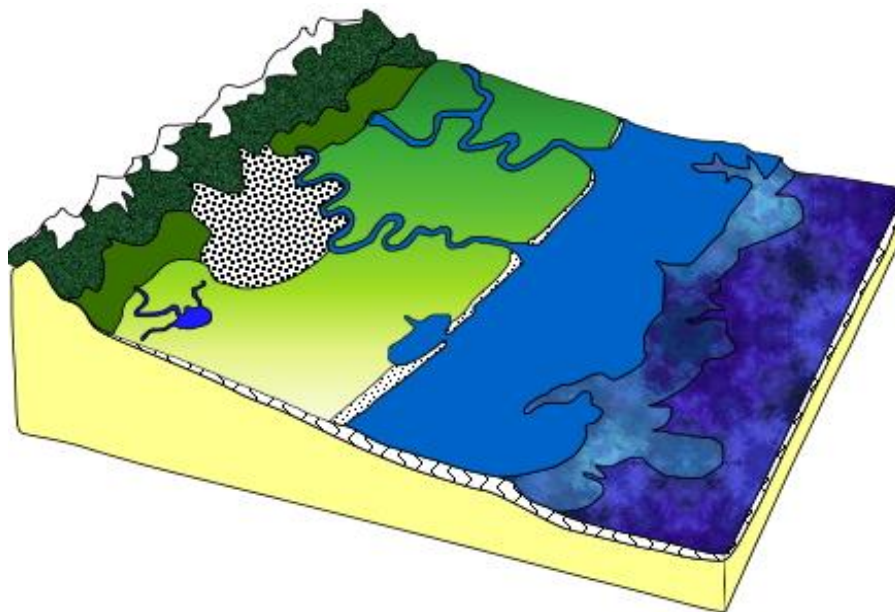
La formación puede estar discordante con las arenas y arcillas del Grupo Rijnland, o cualquier grupo de menor edad (por la tectónica de inversión Subhercynian / Laramide). La Formación arenas verdes del Scruff (por ejemplo, F03, L03-01, Vlieland Oost-1) por lo general muestra un contacto conforme con la subyacente Formación Arcillas del Kimmeridge .

A esta formación la subyace la formación Graben Superior.

Ambiente deposicional

Los sedimentos de la Formación Arcillas del Kimmeridge fueron depositadas en un ambiente de plataforma nerítica exterior. Esta depositación se produjo principalmente a partir de la suspensión, con ocasionales flujos relacionados con la tormenta de arena. Debido a que capas Dolomíticas ocurren con más frecuencia hacia el norte, se asume que debe haber habido períodos de disminución de aporte de sedimentos clásticos.

Figura 7. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Arcillas del kimmeridge



Fuente: <http://geologiavenezolana.blogspot.com> y modificado por el autor

Formación Arenas verdes del Scruff

Son areniscas principalmente masivas, bien clasificadas. La formación generalmente tiene un contenido muy alto de glauconita y muestra cantidades variables materia arcillosa.

Tabla 7. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Arenas verdes del Scruff

Datos Generales	
Pozo	F15-02
Locación	N54°14'18.5 E 04°50'44.9
Profundidad	3021 to 3276 m
Longitud	255 m a lo largo del pozo
Referencia	<i>Herngreen and Wong (1989)</i>

Fuente: www.dinolocket.nl

Los sedimentos del Grupo Rijnland (o antes) se encuentran en contacto discordante sobre la formación arenas verdes del Scruff. Una discordancia intraformacionales de edad Ryazanian puede estar presente.

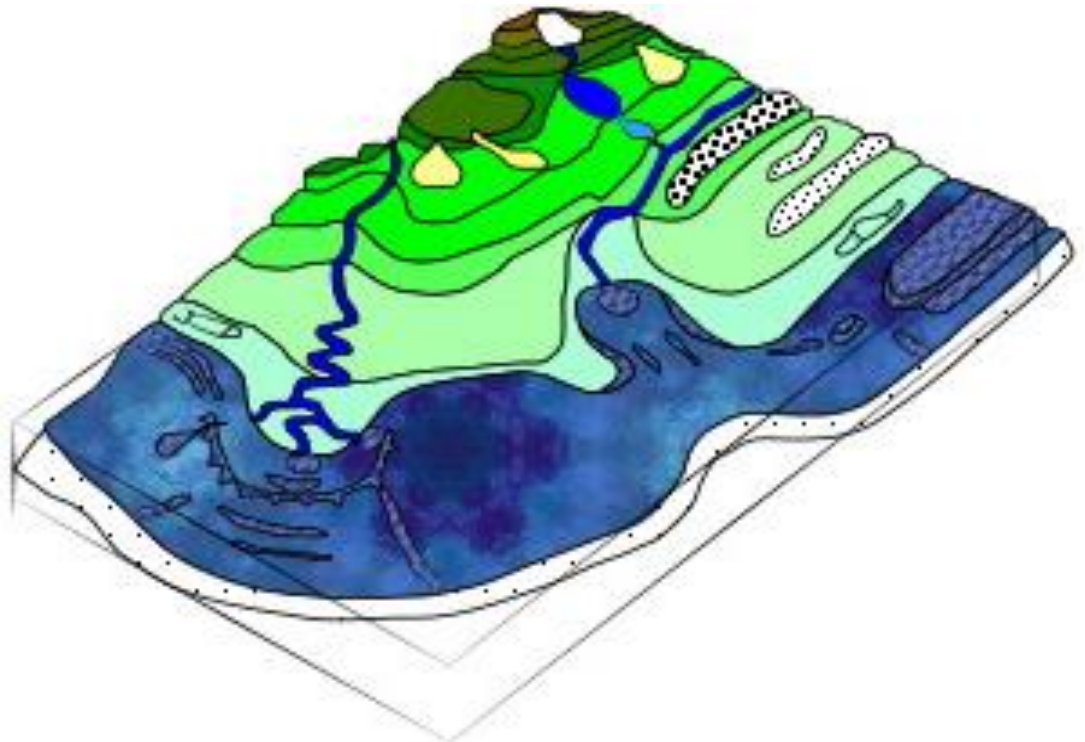
El contacto con la suprayacente a la Formación arcillas del Kimmeridge y parece ser conformable y gradual.

Ambiente deposicional

La Formación arena Verde de Scruff fue depositada en una plataforma marino poco profunda (por encima de la tormenta ola-base). Como resultado los bancos de arena y el retrabajamiento de las mismas que se enriquece en los sedimentos de grano grueso. Esta reelaboración continua se refleja también en su contenido de glauconita.

Secuencia estratigráfica

Figura 8. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Arenas Verdes del Scruff



Fuente: <http://sed.com.sapo.pt> y modificada por el autor

La Formación Arenas verdes del Scruff representa sobre todo los depósitos progradacionales de los ciclos de highstand y lowstand system tract.

La deposición del Grupo Scruff, fue seguida en el cretácico temprano por el Grupo Rijland, y está compuesto principalmente de margas y lodolitas carbonatadas y es interpretado por ser un depósito hemipelágico que se formó en un ambiente marino (Johnson & Lott, 1993; McLeod, 2000; McLeod et al., 2002; Copestake et al., 2003). Agrupa a las formaciones Clay Deep (Arcillas Profundas), Arcillas de Vieland, Areniscas de Vieland, Formación Holanda y Formación Chalk. Las formaciones Arcillas de Vieland y arcillas profundas, se componen de unidades dominadas por shale (lutita) y lodolitas y las dos formaciones son difíciles de distinguir solo por criterio litológico (Richards et al., 1993).

Formación Clay Deep

Las arcillas son generalmente bastante bituminosas, pero localmente poseen menos materia orgánica. Y tiende a mostrar lecturas en el registro Gamma Ray más altos que las otras formaciones arcillosas.

Tabla 8. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Deep (Arcillas profundas)

Datos Generales	
Pozo	F03-01
Locación	N54°59'40.0 E 04°54'18.0
Profundidad	2265 to 2335 m
Longitud	70 m a lo largo del pozo
Referencia	<i>Herngreen and Wong (1989)</i>

Fuente: www.dinoloket.nl

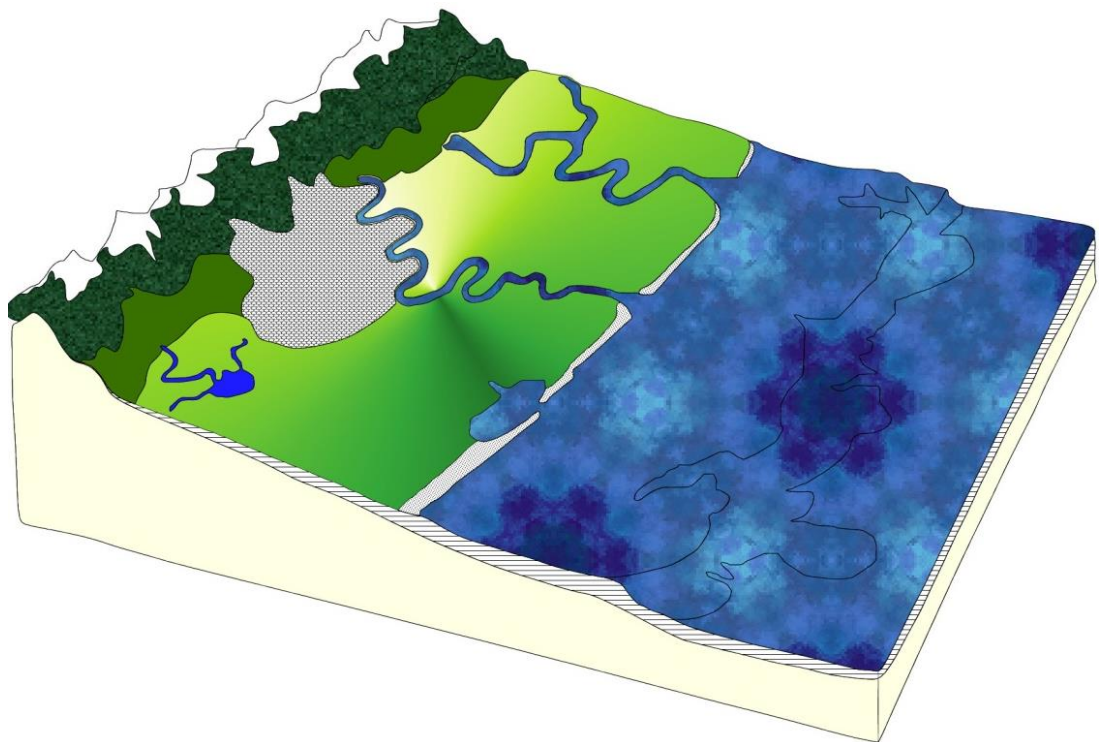
El límite superior está formado por la discordancia tardío Kimmerian, cubierto (a veces prácticamente conformemente) por el Grupo de Rijland o la Formación Chalk.

La base de la formación Claydeep es el contacto conforme con el miembro principal de la formación arcillas del Kimmeridge (por ejemplo, B18-02) o la Formación arenas verdes del Scruff (por ejemplo, F03-01). Las lutitas bituminosas de esta formación se pueden distinguir fácilmente de la formación arcillas del Kimmeridge por su mayor respuesta GR-y los registros de resistividad. El contacto con la Formación arenas verdes del Scruff a continuación es bastante claro a causa del cambio en la litología.

Ambiente deposicional

El miembro Claydeep se depositó en un ambiente de plataforma nerítica-exterior. Los clastos finos y la materia orgánica se establecieron por suspensión. Los sedimentos bituminosos indican un estancamiento en la circulación de la cuenca cuyas condiciones cambiaron de disóxicas a anóxicas.

Figura 9. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Clay Deep



Fuente: <http://geologiavenezolana.blogspot.com> y modificado por el autor

Formación Areniscas de Vlieland

Son arenas sub-angulares a bien redondeadas, tiene miembros arcillosos, localmente se puede clasificar como areniscas conglomeráticas, pueden tener estratificación cruzada, presencia de micas, fragmentos de conchas y partículas de lignito. Es común observar una secuencia grano creciente con intercalaciones de lutita fosilífera.

Tabla 9. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Areniscas de Vlieland

Datos Generales	
Pozo	Vlieland Oost-1
Locación	N53°17'22.2 E 05°04'17.6
Profundidad	2200 to 2246 m
Longitud	46 m a lo largo del pozo
Referencia	<i>NAM and RGD (1980)</i>

Fuente: www.dinoloket.nl

La parte superior por lo general consiste en el contacto conforme con la Formación Arcillas de Vlieland

Ambiente deposicional

Generalmente se interpreta como arenas basales porque su depositación se dió en un ambiente transgresivo (LAG) de igual forma también son nombradas como arenas progradantes de barra costera.

Figura 10. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Areniscas de Vlieland



Fuente: <http://sed.com.sapo.pt> y modificada por el autor

Estratigrafía de Secuencias.

Dependiendo de la posición en la cuenca, Transgressive and Late Highstand systems tracts of Haq (1988)

Formación Arcillas de Vlieland

Generalmente, las arcillas son ligeramente calcáreas. En las áreas offshore la parte superior de la formación puede ser localmente muy calcárea. Son de color marrón a gris oscuro y contienen gran cantidad de micas.

Tabla 10. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Arcillas de Vlieland

Datos Generales	
Pozo	Vlieland Oost-1
Locación	N53°17'22.2 E 05°04'17.6
Profundidad	1650 to 2200 m
Longitud	550 m a lo largo del pozo
Referencia	NAM and RGD (1980)

Fuente: www.dinoloket.nl

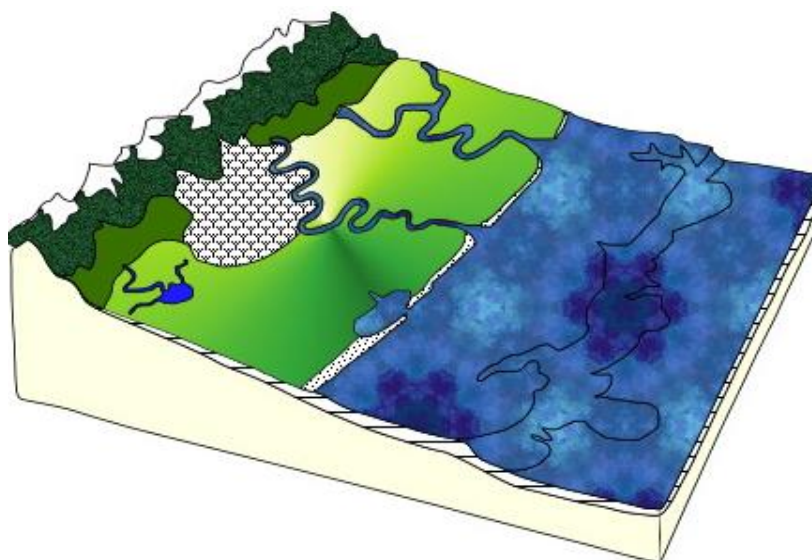
La parte superior está tomada en el contacto prácticamente conforme con la Formación Holanda, o el contacto claramente discordante con el Grupo de Chalk o el Grupo Menor Mar del Norte. En la Cuenca Oeste Holanda el límite superior con la formación, areniscas de Vlieland es gradual.

Cuando la Formación Arenisca de Vlieland está presente, el contacto más o menos conforme con la formación general es bastante agudo. De lo contrario, la Formación arcillas de Vlieland puede descansar en discordancia en una amplia gama de formaciones mayores

Ambiente deposicional

Generalmente considerado depositado en una zona marina de moderada a bastante profunda, donde los finos y carbonatos secundarios se establecieron. Capas de arena fina se depositan principalmente durante las tormentas y los periodos de cuña de mar bajo.

Figura 11. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Arcillas de Vlieland



Fuente: <http://geologiavenezolana.blogspot.com> y modificado por el autor

Secuencias Estratigráfica

Dependiendo de la posición en la cuenca, puede ser later Transgressive to Early Highstand systems tracts Haq (1988).

Formación Holanda

Secuencia de margas grises y de color marrón rojizo y arcillas margosas, localmente con intercalaciones bastante delgadas de lutita bituminosa o incursiones más gruesas de arenas verdes.

Tabla 11. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Holanda

Datos Generales	
Pozo	L05-01
Locación	N 53°44'31.8 E 04°31'44.6
Profundidad	2295 to 2403 m
Longitud	108 m along hole
Referencia	<i>NAM and RGD (1980)</i>

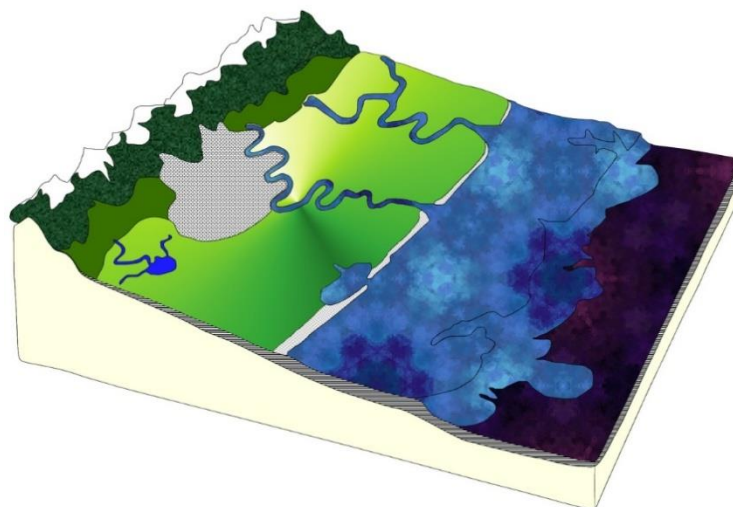
Fuente: www.dinoloket.nl

La Formación Holanda se superpone a la Formación Arcillas de Vlieland, el contacto se caracteriza por un pronunciado aumento al alza en el contenido de carbonato, que se refleja en una disminución de las lecturas del GR y un aumento de la resistividad y la velocidad sísmica, además un cambio en la respuesta de los registros SP.

Ambiente deposicional

Generalmente considerado como depositada en un entorno marino de moderado a bastante profundo, donde los finos y carbonatos bioclásticos se establecieron. Depósitos bituminosos indican períodos de circulación cuenca baja estancada. Capas de arena finas ocasionales fueron depositados durante las tormentas. La presencia de abundante glauconita indica intensa criba, mientras que los datos sísmicos, diferencias de grosor y patrones enrojecimiento sugieren la existencia de varios hiatos.

Figura 12. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de deposición de la formación Holanda



Fuente: <http://geologiavenezolana.blogspot.com> y modificado por el autor

Formación Chalk

Predominantemente formado por rocas carbonatadas. Originalmente, estas calizas tenían una naturaleza más calcárea, pero como resultado de enterramiento profundo, se compactaron fuertemente y se convirtieron en más densas.

Tabla 12. Se muestra un resumen detallado de los datos geográficos y de profundidad donde se localiza la sección tipo de la formación Chalk

Datos Generales	
Pozo	De Paauwen-1
Locación	N53°16'30.4 E 06°45'15.5
Profundidad	822 to 1720 m
Longitud	898 m a lo largo del hueco
Referencia	NAM and RGD (1980)

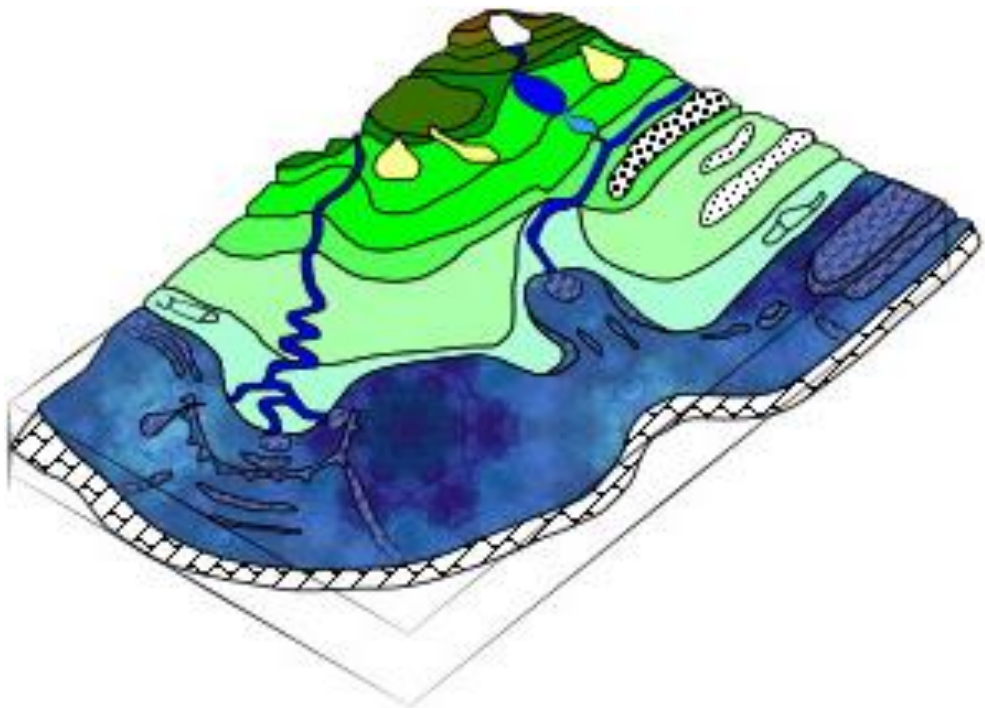
Fuente: www.dinoloket.nl

La base de la formación está en contacto concordante con las margas de la formación Holanda.

Ambiente deposicional

Refleja la deposición en un ambiente marino somero. La roca dura, presente en toda la secuencia, se relacionan con subrosion, no deposición o abrasión causada por cualquiera de las fluctuaciones del nivel del mar o el levantamiento tectónico de pequeña escala.

Figura 13. Se ilustra de forma general el ambiente sedimentario al cual se hace referencia en el texto y que describe el sistema de depositación de la formación Chalk.



Fuente: <http://sed.com.sapo.pt> y modificada por el autor

A continuación se muestra la columna estratigráfica donde se detalla las formaciones que se depositaron antes, durante y después del rift en la ubicación geográfica de interés, cabe resaltar que la simbología de estas formaciones ha sido modificada de tal manera que detalle el nombre de la formación y su periodo de depositación. Debido a la posición geográfica en la que se encuentra el bloque y la influencia que este tiene de países como Holanda, Dinamarca y en menor proporción Reino unido, los grupos, subgrupos y formaciones podrían variar en las literaturas consultadas, sin embargo se trató de realizar un compilado que resumiera con gran calidad esos datos.

Figura 14. Columna estratigráfica regional de los Grupos y Formaciones depositados en la cuenca del mar del norte antes, durante y después del rift que dio su origen.

Ma	Período	Piso	Grupo-Formación	Litología	Ambiente
0.01	Terciario	Neogeno	Calabriano	TnOo	Marino Profundo
1.8			Gelasiano	TnSch	Marino Somero
2.8			Placenziano	TnKi	Marino Profundo
3.6			Zancleano	TnBr	Marino Somero
5.3			Messiniano	TnIn	costero
7.2			Tortoniano	TnVi	costero
11.6			Sarrovaliano	TpVe	Marino Somero
13.8			Langaniano	TpRu	Nertica Interior
16.0			Burdigaliano	TpTo	Marino Somero
20.4			Aquitano	TpD	Nertica Interior
23.0	Terciario	Paleogeno	Cattiano	TpL	Marino Profundo
28.4			Rupeliano	KsEk	Marino Somero
33.9			Priaboniano	KsOm	Marino Somero
37.2			Baritoniano	KsTx	Marino Somero
40.4			Luteniano	KIRCH	Marino Somero
48.6			Ypresiano	KiH	
55.8			Tanetiano	KiCSV	Marino Profundo
58.7			Seladiano	KiSSV	Turbidítico
61.7			Daniano	KiCD	Nertica Exterior
65.5				JIGSSS	Marino Somero
70.6	Cretácico	Tardío	Maastriciano	JICK	Marino Somero
83.5			Campaniano	JTUG	Deltaico
85.8			Santoniano	JMG	Lacustrino, Pantanos
89.3			Coniaciano	JmLG	
93.2			Turoniano		
99.6			Cenomaniano		
112.0		Temprano	Albiano	JAA	Continental, Marino somero y Marino profundo
125.0			Apatiano		
130.0			Barremiano		
136.4			Hauteriviano		
140.2			Valanginiano		
145.5			Barrisiano		
150.8	Jurásico	Tardío	Titoniano		
155.7			Kimmeridgiano		
161.2			Oxfordiano		
164.7		Medio	Calloviano		
167.7			Batoniano		
171.6			Bajociano		
175.6		Temprano	Aaleniano		
183.0			Toarciano		
189.6			Pliensbachiano		
196.5			Sinemuniano		
199.6	Triásico	Tardío	Hettangiano		
203.6			Rhaetiano		

LEYENDA	
TnOo	FORMACIÓN OOSTERHUT
TnSch	FORMACIÓN SCHEEMDA
TnKi	FORMACIÓN KIESELOOLITE
TnBr	FORMACIÓN BREDA
TnIn	FORMACIÓN INDEN
TnVi	FORMACIÓN VILLE
TpVe	FORMACIÓN VELDOVEN
TpRu	FORMACIÓN RAPEL
TpTo	FORMACIÓN TANGEREN
TpD	FORMACIÓN DANGEN
TpL	FORMACIÓN LANDEN
KsEk	FORMACIÓN EKOFISK
KsOm	FORMACIÓN OMMELANDEN
KsTx	FORMACIÓN TEXEL
KIRCH	FORMACIÓN TIZA ROJA
KiH	FORMACIÓN HOLANDA
KiCSV	FORMACIÓN ARCILLAS DE VLIELAND
KiSSV	FORMACIÓN ARENISCAS DE VLIELAND
KiCD	CLAY DEEP FORMATION
JIGSSS	FORMACIÓN ARENISCAS VERDES SCRUF
JICK	FORMACIÓN ARCILLAS DEL KIMMERIDGIAN
JTUG	FORMACIÓN GRABEN SUPERIOR
JMG	FORMACIÓN GRABEN MEDIO
JmLG	FORMACIÓN GRABEN BAJO
JAA	FORMACIÓN AALBURG
TIS	FORMACIÓN SLEEN

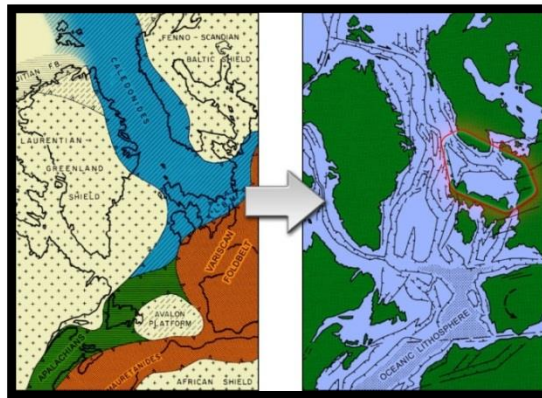
Fuente: Tomado de <http://www.nlog.nl/> y modificado por el autor

2.2. MARCO TECTONO-SEDIMENTOLOGICO

2.2.1. Tectónica Regional

Las estructuras que se generaron en la era Mesozoica debajo del Mar del Norte pueden ser vistas como un sistema de Rift fracasado. Después de la extensión inicial de la corteza y la formación de cuencas de Rift durante los períodos Triásico y Jurásico, la extensión se concentró en el otro lado de las Islas Británicas, que crearía el norte del Océano Atlántico, como se puede apreciar en la figura 15. Las cuencas de Rift incluso tuvieron alguna inversión entre épocas del Cretácico y el Eoceno. A partir del Oligoceno, las tensiones en la corteza europea causadas por la orogenia alpina hacia el sur provocaron una nueva y más modesta fase de extensión.

Figura 15. Una visión general de la zona del Mar del Norte y la región del Atlántico Norte adyacente durante el Paleozoico (izquierda) y Post Mesozoico (derecha). La complejidad tectónica de esta zona se hace muy clara en esta imagen como tres cinturones plegados



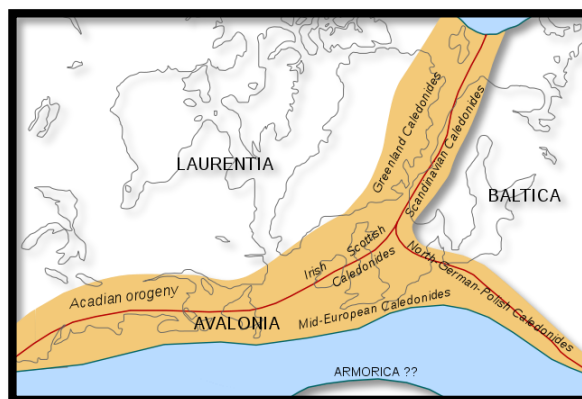
Fuente: Tomado de Exploration, Production and Geology <http://www.epgeology.com>

2.2.2. Evolución Tectónica

La historia tectónica del mar del norte puede ser subdividida en 5 etapas.

1. Geosinclinal caledoniano (cámbrico-devoniano): las rocas intrusivas y metamórficas de edad caledoniana forman el complejo basamento de gran parte del mar del norte.

Figura 16. Configuración geográfica en los periodos comprendidos desde el cámbrico al devónico de la actual ubicación de la cuenca del Mar del Norte.



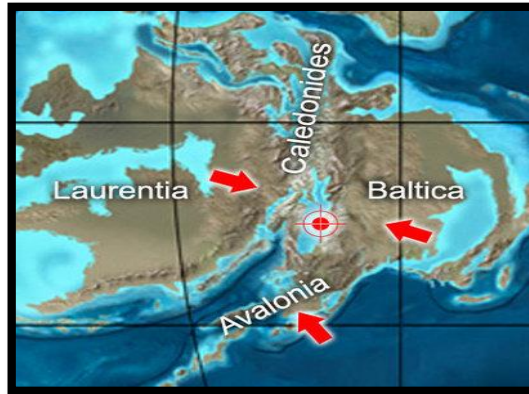
Fuente: Tomado de Exploration, Production and Geology <http://www.epgeology.com>

En el periodo Ordovícico tardío, Avalónia chocó con Báltica y creó el Margen Tornquist. A finales del Ordovícico, el Mar Tornquist había sido eliminado. El sistema de fallas Tornquist-Tesseyre también tuvo sus inicios en la orogenia que cierra el Mar Tornquist. Ver figura 16. Durante el período Silúrico tardío, luego Báltica chocó con Laurencia que se denomina la fase escandinava de la orogenia Caledoniana. Ver figura 17. Báltica se hunde por debajo de Laurencia formando el cinturón Caledoniano.

La orogenia Caledoniana causó el cierre del océano de Iapetus cuando los continentes y terrenos, Laurencia, Báltica y Avalónia chocaron. La masa combinada de los tres continentes se formó un "nuevo" continente: Laurasia.

La orogenia Acadiana se produjo en el período Devónico. Los continentes de Laurencia y Báltica chocaron. El océano de Iapetus desapareció bajo esta colisión continental. Estas fuerzas de las placas tectónicas crearon una cadena montañosa que se extiende desde lo que hoy se denomina el Adirondacks norte a través de Nueva Escocia, las Islas Británicas, Noruega y el margen oriental de Groenlandia.

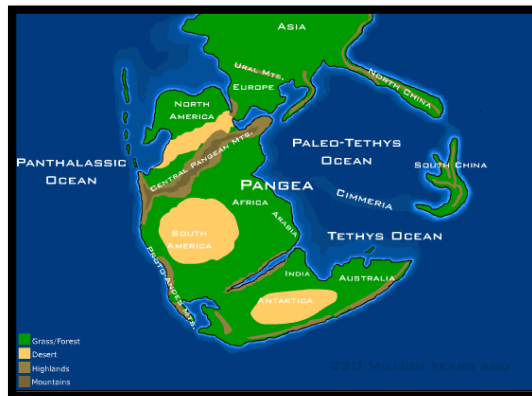
Figura 17. Formación de las cadenas caledónicas



Fuente: Tomado de Exploration, Production and Geology <http://www.epgeology.com>

2. Geosinclinal Hersinico (devónico y carbonífero): la depositación transgresiva desde el sur sobre las erosionadas cadenas caledónicas alcanzaron un espesor máximo en el mar del norte meridional. Esta zona formo parte de la cuenca de ante país que formó las cadenas hersinicas.

Figura 18. Súper-continente Pangea, configuración geográfica después de la orogenia hersinica.



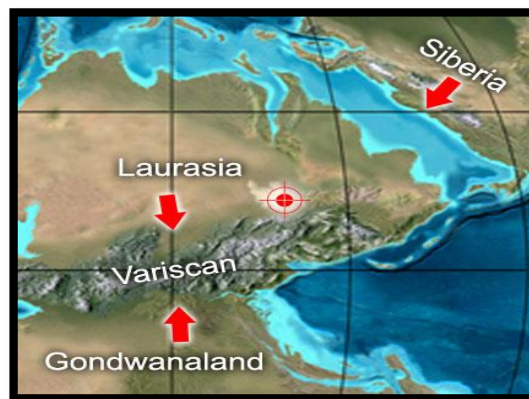
Fuente: Tomado de Exploration, Production and Geology <http://www.epgeology.com>

Durante la orogenia Hercínica ocurrieron dos acontecimientos de gran magnitud, el Océano Rheico u océano Proto-Tetis fue eliminado y el super continente Pangea se formó. Ver figura 18. Los continentes de Gondwana y Laurasia chocaron, ambos fueron a la deriva hacia el

norte, sin embargo Gondwana se desplazaba a una velocidad mayor. También se creó la cadena montañosa que se extiende a lo largo de España, Bretaña, el centro de Alemania y en Polonia. El cierre del Océano Rheico a finales del Carbonífero formó empujes en el sur de Inglaterra. Ver figura 19

El super continente Pangea se añadió en el período Pérmico tardío cuando Siberia chocó con Báltica y Kazajstán. Pangea estaba rodeado de enormes placas tectónicas en subducción. La zona del Mar del Norte fue fundamental para el super continente Pangea continental. En este período, el área ahora llamada el Mar del Norte se encontraba en las zonas subtropicales y fue un ambiente árido y no marino.

Figura 19. Formación de las cadenas Hersinica o varicana

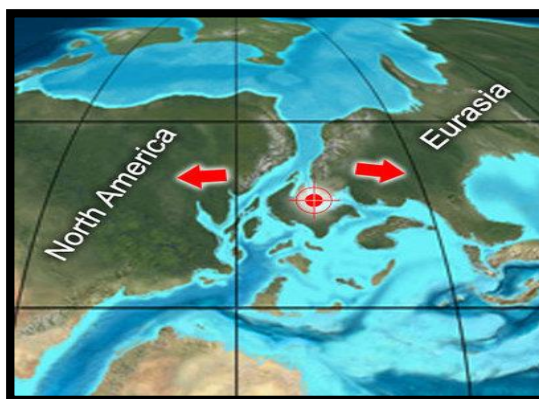


Fuente: Tomado de Exploration, Production and Geology <http://www.epgeology.com>

3. Etapa intracratónica (Pérmico-Triásico). Tras la orogénesis Hercínica, gran parte del Mar del Norte fue ocupada por la rápida subducción intracratónica del Norte y las cuencas del sur en el Pérmico. Estas cuencas contienen una secuencia gruesa de depósitos clásticos y evaporíticos.

El desarrollo del sistema de rift del Mar del Norte se inició durante el Triásico y dominó el escenario paleo-geográfico de la zona durante el Jurásico y Cretácico. La evolución del rift del Mar del Norte se relaciona con el desarrollo de la zona de rift del Atlántico Norte. Ver figura 20.

Figura 20. Fracturamiento del Súper-continente Pangea, el punto rojo hace alusión a lo que hoy es la cuenca del mar del norte



Fuente: Tomado de Exploration, Production and Geology <http://www.epgeology.com>

Cuando empezó el Jurásico, Pangea comenzó a dividirse en dos continentes, Gondwana y Laurasia. En este momento los niveles del mar subieron. El enterramiento de las algas y las bacterias bajo el barro del fondo marino durante este tiempo dio lugar a la formación de petróleo del Mar del Norte y el gas natural, gran parte de ella atrapada y recubierta por arenisca por los depósitos formados como los mares aislados que formaron los pantanos y lagos salados.

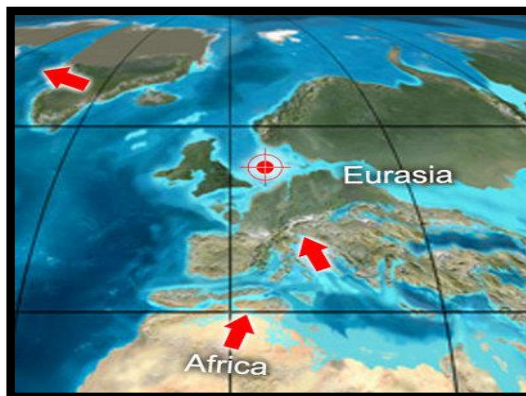
Durante este tiempo se redujo el nivel del mar. Los principales reservorios se crearon en el mar del Norte durante este tiempo como clásticos y arenas se depositaron en ambientes parállicos.

El Grupo Altena fue depositado durante la etapa de subsidencia que siguió al Rift del triásico (Yielding et al., 1992). Sin embargo, el Rift recomenzó durante la deposición de la Formación más joven dentro del Grupo Altena, la Formación Aalborg (NAM and RGD, 1980), y continuo durante toda la deposición del Grupo Graben Central y gran parte del grupo Scruff en el Jurásico medio y tardío (Fraser et al., 2003).

Los Grupos Altena. Graben central y Scruff representan una secuencia transgresiva completa con incremento en la profundidad del agua. Porque de las condiciones anóxicas, la Formación Arcillas de Kimmeridge retuvo altos grados de material orgánico, y por eso es la principal roca generadora en la cuenca del Mar del Norte.

4. Período Cretácico. La principal expansión del rift se dio en este período, (ver figura 21), y se encontraba en una dirección este-oeste. La expansión del suelo oceánico continúa, y los niveles del mar suben. El nivel del mar es de 100 metros (330 pies) a 200 metros (660 pies) por encima de los niveles actuales.

Figura 21. se observa la continuación de rift y la deriva de los continentes hasta su posición actual



Fuente: Tomado de Exploration, Production and Geology <http://www.epgeology.com>

El estancamiento de las corrientes marinas profundas en el Cretácico medio causa circunstancias anóxicas en el agua de mar. En muchos lugares del mundo, se formaron shales oscuros anóxicas durante este intervalo. Estos shales son una importante roca fuente de petróleo y gas, por ejemplo, en el subsuelo del mar del Norte.

El grupo Rijland, fue depositado en el Cretácico temprano siguiendo la deposición del grupo Scruff esta transición marco el final de la actividad del Rift, en el norte del Mar del Norte y empieza la subsidencia térmicamente controlada.

5. Etapa de subsidencia regional; post-rift (Terciario): La fase post Rift es la siguiente a los eventos del Rift en el Jurásico tardío, la subsidencia térmica del Mesozoico y Cenozoico. A medida que el Rift se detuvo, se produjo una subsidencia regional lo que generó la creación de una cuenca sedimentaria intracratónica simétrica. La subducción se produjo debido a un enfriamiento en la litosfera.

El levantamiento posterior se dio en gran parte a lo largo de líneas de debilidad de las antiguas cadenas Caledonianas y Hercínicas. La

compresión intra-placa se produce cuando la cuenca del Océano Atlántico se formó, la difusión de la cordillera del Atlántico medio se ha ocupado de separar el este del oeste. Groenlandia separada de América del Norte y la dirección del Rift fue alterada durante el Paleógeno, lo que causó que el norte de Europa se separase también de Groenlandia.

Durante el período Eoceno, el último puente de tierra a través del Atlántico se hundió.

La orogenia alpina, fue la responsable de la formación de la sub-cuenca del sinclinal de Londres y el anticlinal Weald al sur del mar del norte.

En las épocas del período Neógeno del Mioceno y el Plioceno, hubo más levantamiento que erosión. Los tipos de plantas y animales se convirtieron en sus formas modernas, y por cerca de 2 Ma el paisaje habría sido ampliamente reconocible hoy en día.

El Pleistoceno vio el retiro del mar de la cuenca producto de la glaciación, el nivel del mar se redujo debido a la acumulación de placas de hielo a nivel mundial. Los principales cambios durante el Pleistoceno se han producido por varias glaciaciones recientes.

Durante la glaciación, el agua era tomada de los océanos para formar el hielo a altas latitudes, causando que el nivel del mar mundial se redujera por unos 120 metros, la exposición de las plataformas continentales y la formación de puentes terrestre entre las masas de tierra incentivaron a los animales a migrar. Durante el deshielo, el agua del hielo derretido regresó a los océanos, haciendo que el nivel del mar se elevara.

Las glaciaciones tuvieron un enorme impacto en la costa del Mar del Norte. La costa oeste de Dinamarca es un ejemplo notable, las características producidas durante el Período Glacial Saale y glaciación Weichsel, en la época del Holoceno, cuando los niveles del mar se redujeron la costa norte de Dinamarca dio paso a elevados escarpes, crestas de playa y acantilados.

Durante la máxima glaciación en Escandinavia se toma como referencia regional la glaciación Weichsel, sólo la parte occidental de Jutland estaban libres de hielo, y una gran parte de lo que hoy es el Mar del Norte era tierra firme y conectaba Jutlandia con Gran Bretaña.

En el período posterior al último interglacial antes de la actual (Eemian Stage), de la costa de Noruega también estaba libre de hielo. El Mar del Norte produce fósiles de todos los períodos del Pleistoceno. La zona era un paisaje de estepa seca, cubierto con los ríos, donde vivían animales como el mastodonte, gato cimitarra, el mamut del sur, entre otros.

3. METODO EXPERIMENTAL

3.1. BASE DE DATOS

Se empleó el cubo del bloque F3 de la cuenca del mar del norte, sector Holandés, la sísmica 3D con la que se contó fue adquirida en 1987, cubría un área aproximada de 384km², se compone de 646 in lines y 947 cross lines, y la frecuencia de muestreo es de 4ms. A demás se trabajó a 16 bits en el dominio del tiempo, en la tabla 13 se encuentran resumidos los datos de la misma.

Tabla 13. Descripción compilada de la sísmica.

LEVANTAMIENTO/AÑO	BIN (m)	FRECUENCIA DE MUESTREO (ms)	TIEMPO DE GRABACION (s)	AREA (Km2)	CROSS LINE	IN LINE
TNO/1987	25	4	1,844	384	947	646

Fuente: www.opendtec.org y modificado por el autor

Los pozos ubicados dentro del área eran diversos, todos ellos contaban con diferentes registros entre los cuales se tuvo preferencias por los pozos que tuvieran datos de los registros Sónicos y de Densidad, por su importancia en la elaboración de los sismogramas sintéticos, además del registro Gamma Ray, en total se seleccionaron un total de nueve (9) pozos. En las tablas 14 y 15, se detallan los pozos utilizados y los registros que cada uno posee además de la profundidad inicial y final que alcanza cada uno de ellos.

Tabla 14. Descripción detallada de los datos disponibles.

INFORMACION DISPONIBLE EN LOS POZOS																			
	NOMBRE DE LOS POZOS	F02-1	F02-2	F03-1	F03-2	F03-3	F03-4	F03-6	F03-7	F06-1									
REGISTRO DE POZOS	DENSIDAD (RHOB)	X	X	X	X	X	X	X	X	X									
	SONICO (DT)	X	X	X	X	X	X	X	X	X									
	GAMMA RAY (GR)	X	X	X	X	X	X	X	X	X									
	POROSIDAD (NPHI)	X	NA	X	X	X	X	X	X	X									
	CALIPER	X	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA									
	IMPEDANCIA	X	NA	NA	X	NA	X	NA	NA	X									
	CORRECCION DENSIDAD (DRHO)	NA	X	NA	NA	X	NA	X	X	NA									
	CHECKSHOT	X	NA	X	X	X	X	X	X	X									
LEYENDA																			
NA	NO APLICA																		
X	EXISTENTE																		

Fuente: www.opendtec.org y modificado por el autor

A partir de los registros RHOB, DT y los CHECKSHOT, se pudo obtener los sismogramas sintéticos, el modelo de velocidad se produjo a partir de la información de las velocidades que contenían las tablas T-Z de los CHECKSHOT que se relacionan en la figura 22. Con los registros GR se interpretaron las electrofacies y además sirvieron para diferenciar las litologías presentes.

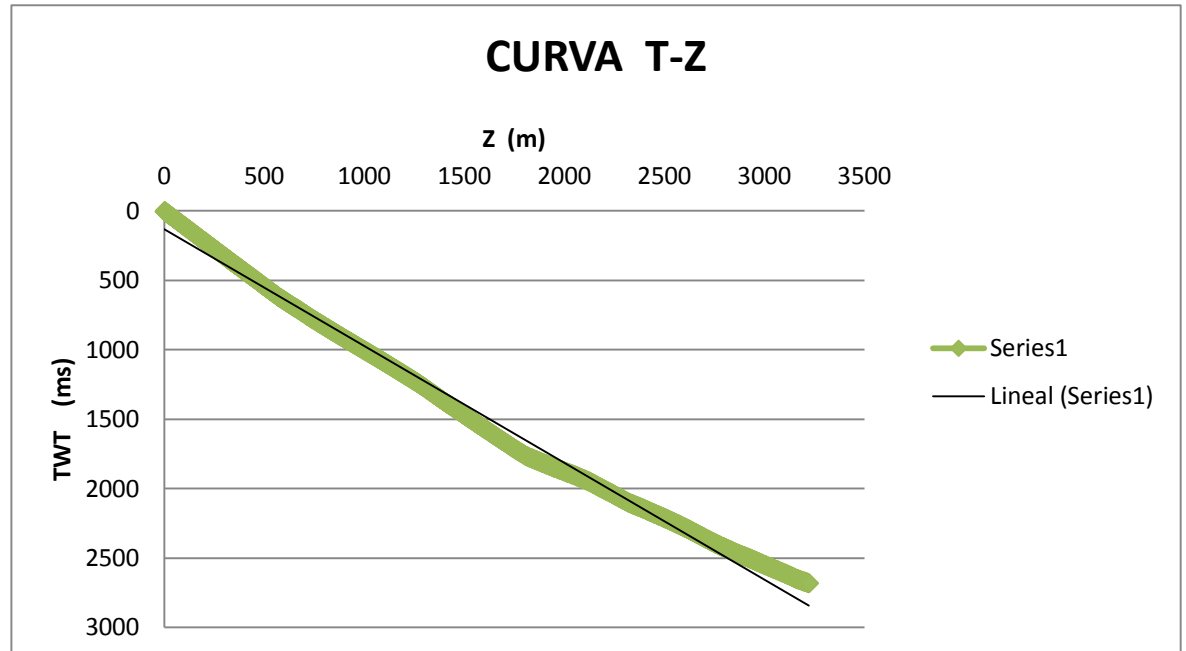
Tabla 15. Relación de los pozos con su registro y la profundidad de los datos disponibles.

	POZOS	F02-1		F02-2		F03-1		F03-2		F03-3		F03-4		F03-6		F03-7		F06-1	
	PROFUNDIDAD TOTAL (m)	3128		2521		3235		2150		3924,9		3150		3700		3108		3530	
	REGISTROS/PROFUNDIDAD (m)	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
REGISTRO DE POZOS	DENSIDAD (RHOB)	262,05	1500,15	422,3	2240	1749,4	3249,5	30,15	2139,75	500,2	3922	30,15	1859,7	501,8	3700	1022,4	3103,8	29,39	1700,09
	SONICO (DT)	48	1500,15	425,4	2240	349,4	3249,7	30,15	2139,75	502,5	3917,8	30,15	1859,7	501,4	3687,7	501,3	3097,8	29,39	1700,09
	GAMMA RAY (GR)	50,1	1500,15	75,3	2240	30,6	3249,5	30,15	2139,75	75,2	3909,9	41,1	1900,05	70,4	3696,8	70,5	3099,8	29,39	1700,09
	POROSIDAD (NPHI)	NA	NA	NA	NA	1747,6	2327,9	NA	NA	2535	3923	NA	NA	1710,3	3700	1022,4	3103,8	NA	NA
	CALIPER	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	IMPEDANCIA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	CORRECCION DENSIDAD (DRHO)	NA	NA	422,4	2240	NA	NA	NA	NA	501,4	3922	NA	NA	501,8	3700	1022,4	3103,8	NA	NA
LEYENDA																			
NA	NO APLICA																		

Fuente: www.opendtec.org y modificado por el autor

En la tabla 15, se puede observar un factor casi constante y es que el datum de los registros GR, inicia desde profundidades muy cercanas a la superficie, comparado con los demás registros, debido a que el registro Gamma Ray es muy importante en interpretación litológica, además de otras utilidades, en el trabajo se utilizó para realizar la interpretación de electrofacies y la interpretación de litologías.

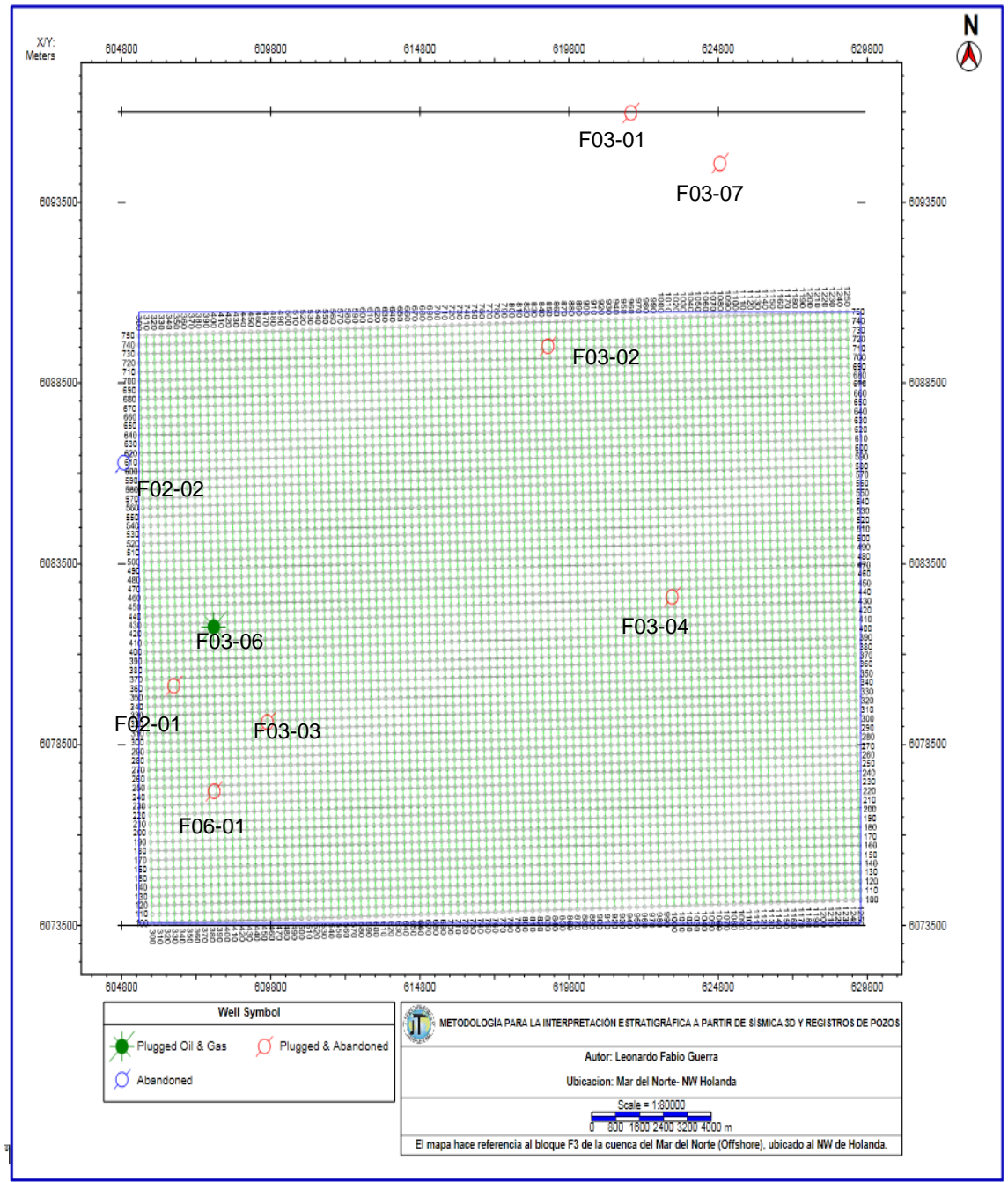
Figura 22. Curva tiempo profundidad para el pozo f03-01



Fuente: autor

Como se ha mencionado anteriormente las tablas T-Z de los CHECKSHOT, son parte fundamental en la realización de modelos de velocidad y en la elaboración de los sismogramas sintéticos. Con los datos de las tablas, se realizaron gráficos que se denominaron como curvas T-Z, con el fin de verificar cierta información, a saber: que todas las curvas T-Z comenzaran en el datum de referencia, que el gradiente de velocidad fuese positivo en profundidad, con la intención de garantizar la no inversión de velocidades, variación en el diametro del pozo, o evitar que estos afectaran la calidad del sismograma sintético.

Figura 23. MAPA DE LA ZONA. Se muestra el área del bloque F3 de la cuenca del mar del norte, que se encuentra cubierto por la sísmica (fondo verde) y los respectivos pozos, ubicados dentro y fuera del área que fueron utilizados en el procesamiento, de acuerdo a la información que cada uno poseía.



Fuente: autor

3.2. CALIBRACION SISMICA-POZO

Para dar inicio a cualquier tipo de interpretación sísmica, es necesario realizar la calibración entre el perfil sísmico vertical y los pozos existentes, la cual permitirá ajustar lo máximo posible el desfase existente entre el cubo sísmico y los marcadores estratigráficos para el momento de la interpretación sísmica.

Lo anterior fue posible teniendo información de pozos como: marcadores estratigráficos (topes), checkshots, registros sísmicos (DT), registros de densidad (RHOB) y gamma ray (GR). Finalmente se pudo identificar la respuesta sísmica de los marcadores estratigráficos de interés.

3.2.1. Resolución de los datos sísmicos

La resolución sísmica es la capacidad para diferenciar puntos u objetos separados, tales como las secuencias sedimentarias de una sección sísmica. Las longitudes de onda cortas y las altas frecuencias proporcionan mejor resolución vertical y lateral (Oil field Glossary, Schlumberger).

Para la realización del cálculo de la resolución vertical de la sísmica vertical, se asume que un evento generará una reflexión para el tope y la base, respectivamente, sin interferencias de ningún tipo, siempre y cuando su espesor sea que un cuarto de la longitud de la onda que se propaga a través del medio.

$$R > \frac{\lambda}{4}$$

A partir del espectro de frecuencias de la sísmica (Figura 24), se determinó la frecuencia ponderada basada en el rango para el cual oscilan amplitudes relevantes. Este rango oscila entre 7 Hz y 65Hz, para lo cual el valor ponderado o promedio de la frecuencia está dado por:

$$f_{Prom} = \frac{65 \text{ Hz} - 7 \text{ Hz}}{2} = 29 \text{ Hz}$$

En base a las curvas del CHECKSHOT de los pozos F02-01, F03-06 y F03-03 se calculan las velocidades intervállicas para la ventana en el cual se interpretarán las secuencias estratigráficas. Para el pozo F02-01, la velocidad intervállica es 1963.7 m/s aproximadamente, para el pozo F03-06 es 2070.51 m/s y para el pozo F03-03 es 2131.25 m/s.

Sabiendo que:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Se tiene:

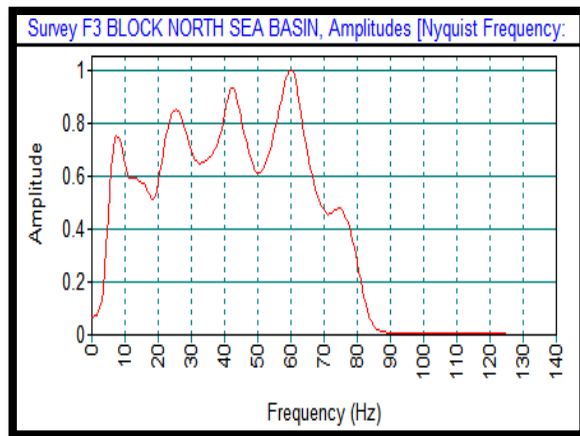
$$\lambda = \frac{(1963.7 + 2070.51 + 2131.25)/3) \text{ m/s}}{29 \text{ Hz}} = 70.86 \text{ m}$$

Finalmente la resolución se calcula por la siguiente fórmula:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{70.86 \text{ m}}{4} = 17.71 \text{ m}$$

Por tanto, los espesores menores a 17.71 metros no pueden resolverse en el cubo sísmico del presente proyecto, es decir estos paquetes no generan reflexiones propias para sus topes y bases que puedan ser apreciables a simple vista sobre la sísmica.

Figura 24. Espectro de Amplitud y frecuencias del cubo sísmico utilizado. Se observa el rango de frecuencias dominantes entre los 7 Hz y 65 Hz.



Fuente: autor

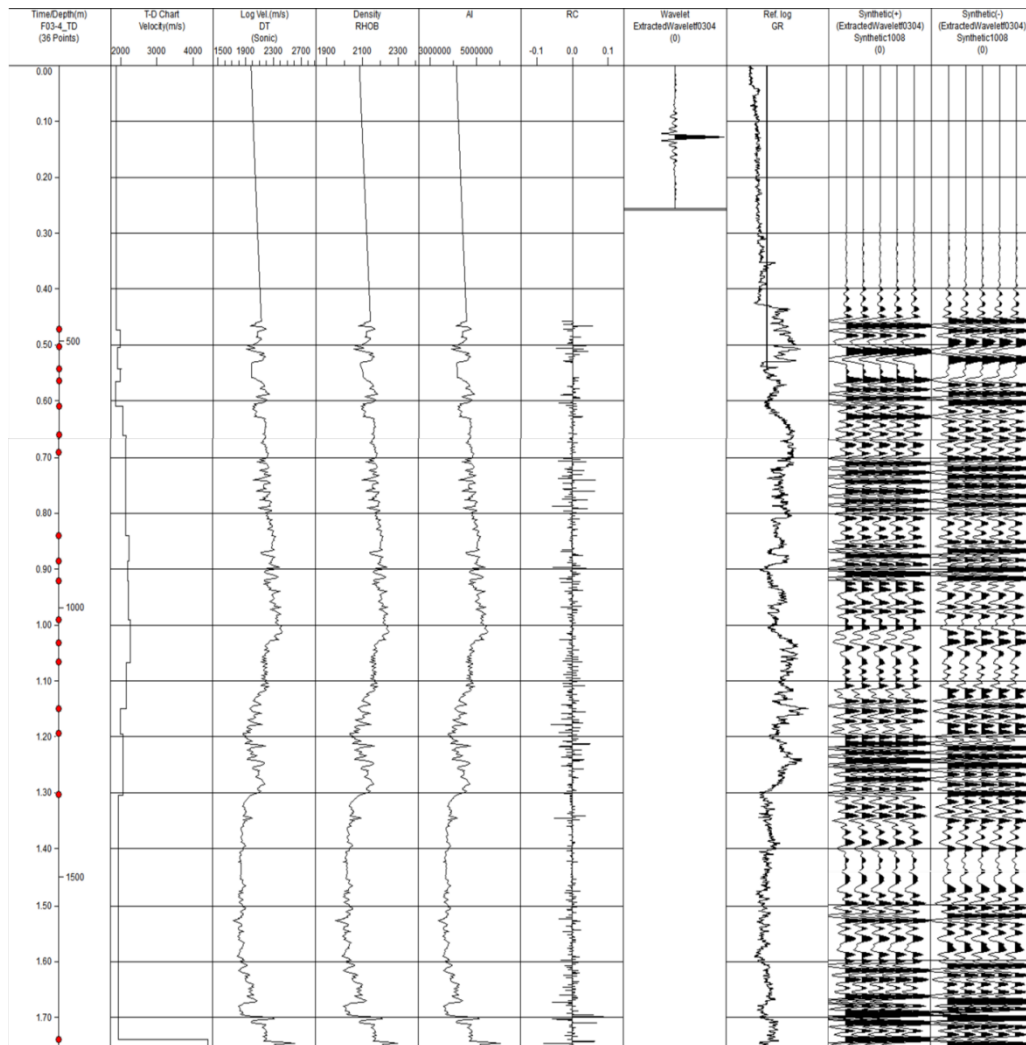
3.3. SISMOGRAMA SINTÉTICO

El sismograma sintético es un modelo unidimensional directo de la energía acústica que se propaga a través de las capas de la tierra y es generado mediante la convolución de la reflectividad derivada de los registros acústicos/sónicos (DT) y de densidad (RHOB), derivándose la ondícula de los datos sísmicos (Oil field Glossary, Schlumberger). El registro acústico o sónico debe ser calibrado con la información de los primeros arribos de un

perfil sísmico vertical (VSP) o un Checkshot antes de combinarlo con el registro de densidad para generar la impedancia acústica.

Realizado lo anterior se generó el sismograma sintético para todos los pozos a excepción del pozo F02-02 el cual no cuenta con los Checkshot respectivos. La siguiente figura pertenece al pozo F03-04 e ilustra el resultado del proceso mencionado anteriormente, indicando de izquierda a derecha: la tabla tiempo-profundidad, el sónico corregido, registro de densidad, la impedancia acústica generada, el coeficiente de reflexión, la ondícula extraída la cual se encuentra en fase, el registro GR de referencia y el sintético de polaridad positiva y finalmente el sintético de polaridad negativa

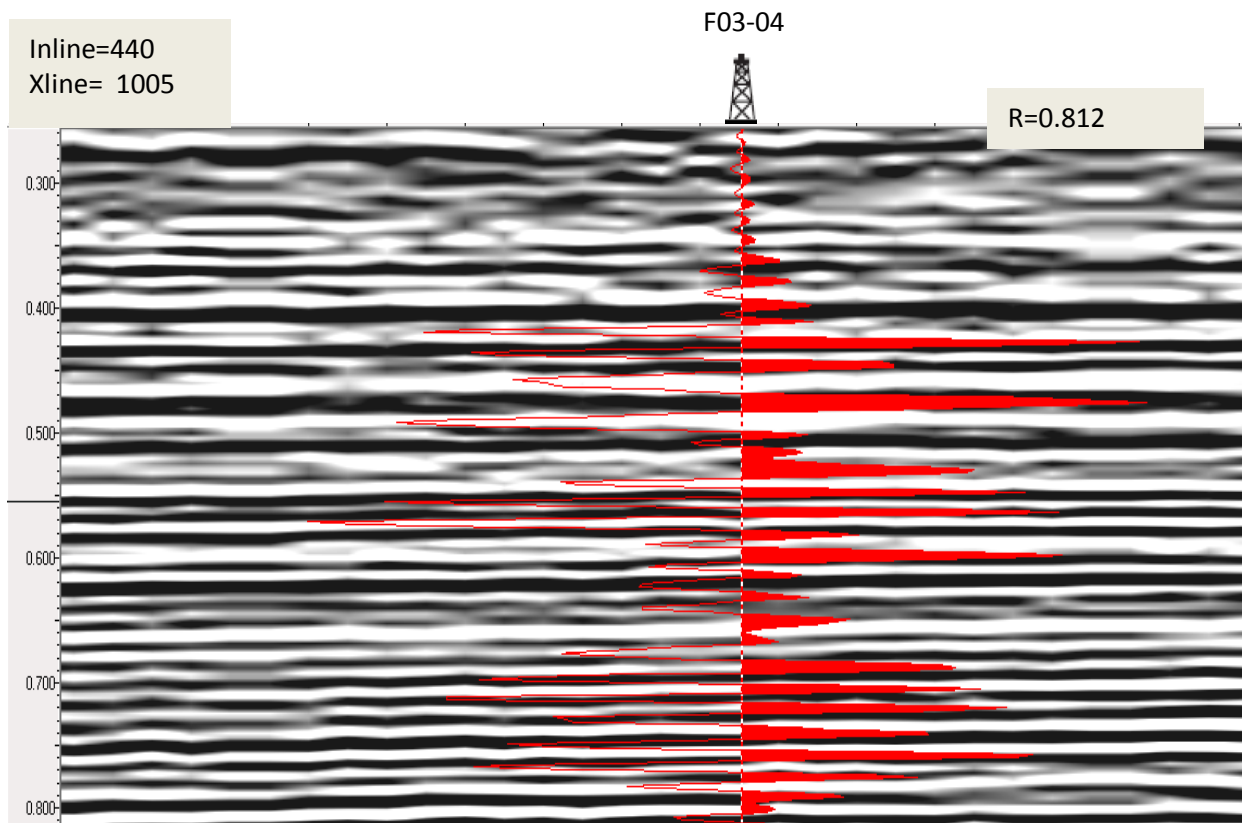
Figura 25. Sismograma sintético del pozo F03-04.



Fuente: autor

Luego se calibró el sintético con los VSP para mejorar el coeficiente de correlación (R) entre ambos. Se procede a desplegar un panel que contenga un inline y que pase por el pozo o cercano a este y se superpone una traza del sintético a éste para poder correlacionarlos, tal como se muestra en la figura 26. Las diferencias en tiempo observadas de una con respecto al otro se corrigen mediante la herramienta *shift* del software The Kingdom Suite.

Figura 26. Calibración del sintético (en rojo) y la sísmica. Factor de correlación 0.812



Fuente: autor

En la figura anterior se puede observar que el sismograma sintético amarra bastante bien con la sísmica debido a que las amplitudes positivas del sismograma corresponden a las amplitudes positivas de la sísmica y las amplitudes negativas del sintético concuerdan con las amplitudes negativas de la sísmica. La calidad del amarre disminuye hacia la base donde el ruido enmascara la señal y se observan desfases.

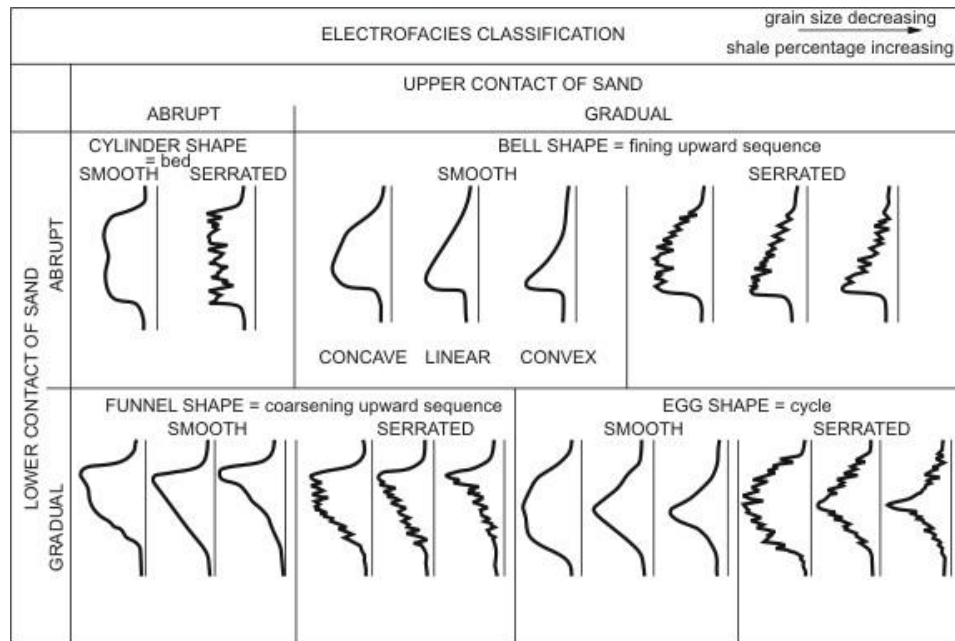
3.4. ELECTROFACIES

La forma de las curvas de los registros de pozo puede servir para dar una interpretación aproximada del ambiente de depositación. Asociar los registros de pozos a facies litológicas no es una tarea sencilla, pues en determinadas ocasiones los registros no reflejan las verdaderas condiciones de las rocas y se ven afectadas por otros factores, o simplemente la naturaleza misma de la roca produce un efecto en los registros que no dan mucha claridad a la hora de ser interpretados, el registro GR ha sido ampliamente estudiado para realizar este tipo de interpretaciones faciales (Nanz 1959).

Los registros eléctricos son útiles para obtener las primeras apreciaciones sedimentarias de un reservorio. Los registros con los que cuenta este proyecto se encuentran detallados en la tabla 14 mostrada en la sección de Base de datos. para realizar la interpretación de electrofacies se utilizaron los pozos que contaran con los registros Sónicos (DT) y Gamma Ray (GR). Esto debido a que ningún pozo cuenta con el registro de Potencial Espontáneo (SP) que sería el mas apropiado para cumplir el objetivo, además el software obliga a tener mas de un registro y, basándose en la teoría así mismo en el método de prueba y error, se observó que los registros DT cumple con las características necesarias para este fin.

En la curva GR por ejemplo se debe estudiar el tipo de contacto (neto o progresivo) entre arenas y lutitas, con esto podemos obtener la granulometría, efecto de Arcillocidad y niveles de energía. En la siguiente figura se observa el patrón de interpretación de las electrofacies.

Figura 27. En el diagrama se muestra el rango de manera general de las posibles respuestas en los registros GR y SP. Cada curva representa una "electrofacies" dependiendo directamente de la clasificación de las formas de dicha curva.



Fuente: <http://booksite.elsevier.com>

Las curvas con forma de campana las cuales presentan un comportamiento grano decreciente hacia el tope de la sección son asociadas a canales de abanico submarino y a arenas transgresivas o facies turbidíticas.

La forma cilíndrica de una curva sugiere una litología de granulometría homogénea espesores de importancia considerable los cuales se encuentran delimitados en su base y en su tope por arcillas que se encuentra asociada a plataformas carbonáticas, arrecifes y cañones submarinos.

Las curvas con forma de cono o embudo nos muestran un incremento en el tamaño de grano de base a tope o una secuencia grano creciente la cual está relacionada con sistemas progradantes como lo son los ambientes marinos someros como bancos de carbonatos, barras marinas someras, islas de barreras y arrecifes carbonáticos, en algunos casos se asocia a lóbulos de abanicos submarinos.

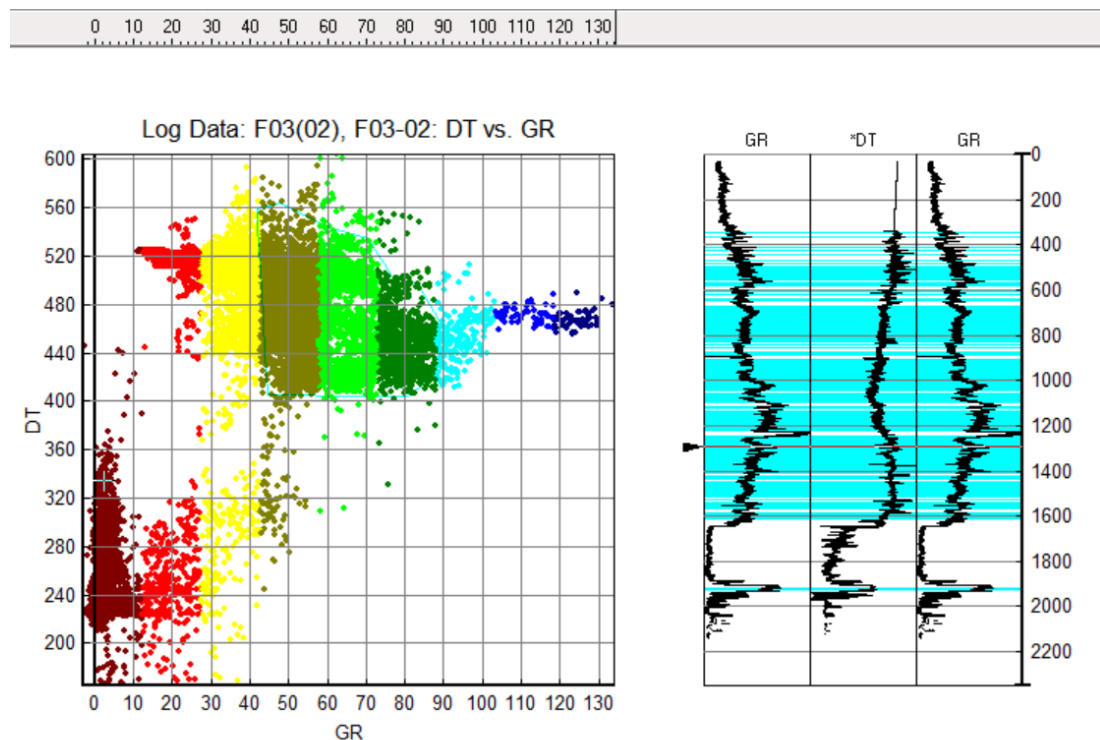
La forma de óvalo o simétrica en las curvas en los registros eléctricos pueden tener varias definiciones de facies de depositación, entre algunas de estas podemos nombrar: barras de desembocaduras que están siendo erosionadas por canales distributarios lo cual sería un ejemplo de secuencias progradantes y retrogradantes, un relleno de canal decreciendo

hacia el tope con unas lutitas suprayacentes, sistemas de canales de lóbulos de abanicos submarinos o clastos de conglomerados o brechas.

Por último los registros que presentan curvas con formas lineales definen espesores considerables de secuencias lutíticas, las cuales son características de depósitos marinos, de marismas, de carbones o lutitas.

El modelamiento de electrofacies con el software The Kingdom se realizó utilizando la herramienta Crossplot, asignando los registros a los ejes X, Y y Z, y activando la función modelamiento tal como se observa en la figura 28.

Figura 28. Muestra del resultado que arroja el modelamiento de electrofacies en el software



73.512, Z[GR]: Active Polygon Set: AMBIENTE SEDIMENTARIO:MARINO SOMERO

Fuente: autor

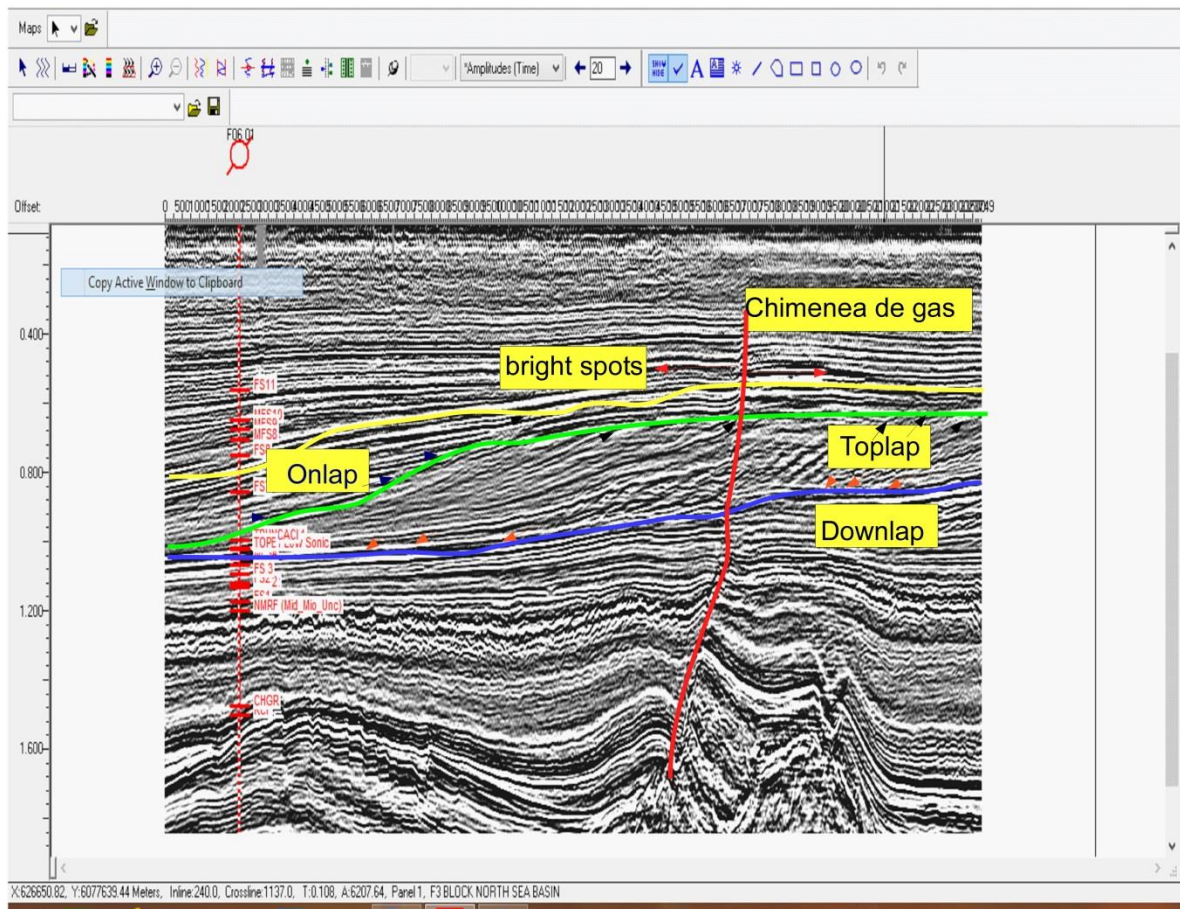
3.5. GEOMETRÍAS ESTRATALES Y FACIES SÍSMICAS

La estratigrafía sísmica es una herramienta de interpretación, empleada para la definición de secuencias depositacionales y sus facies sedimentarias a partir de datos sísmicos. Uno de los principios básicos de la estratigrafía sísmica, consiste en la interpretación de terminaciones estratales y

configuraciones de las reflexiones sísmicas para el reconocimiento y la correlación de las secuencias en la predicción de litofacies y ambientes deposicionales (Mitchum et al., 1977b).

En estratigrafía sísmica, la individualización de las secuencias deposicionales se hace a partir de los patrones de terminaciones de reflexiones, cuyos principales tipos son onlap, downlap, toplap, truncamiento o conformidades. Ver Figura 29

Figura 29. Se muestran los patrones encontrados en la sísmica

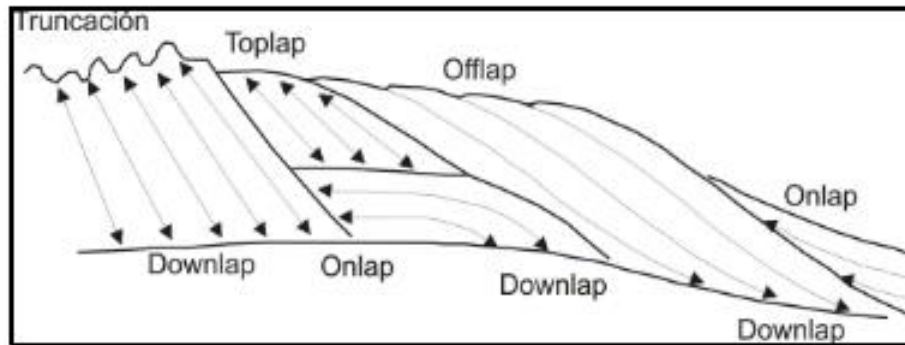


Fuente: autor

Más allá de la delimitación de secuencias deposicionales, la interpretación de los patrones internos de reflexión que componen las facies sísmicas, pueden predecir el tipo de litología, procesos de sedimentación y las características deposicionales que componen determinada unidad estratigráfica (Brown and Fisher, 1977).

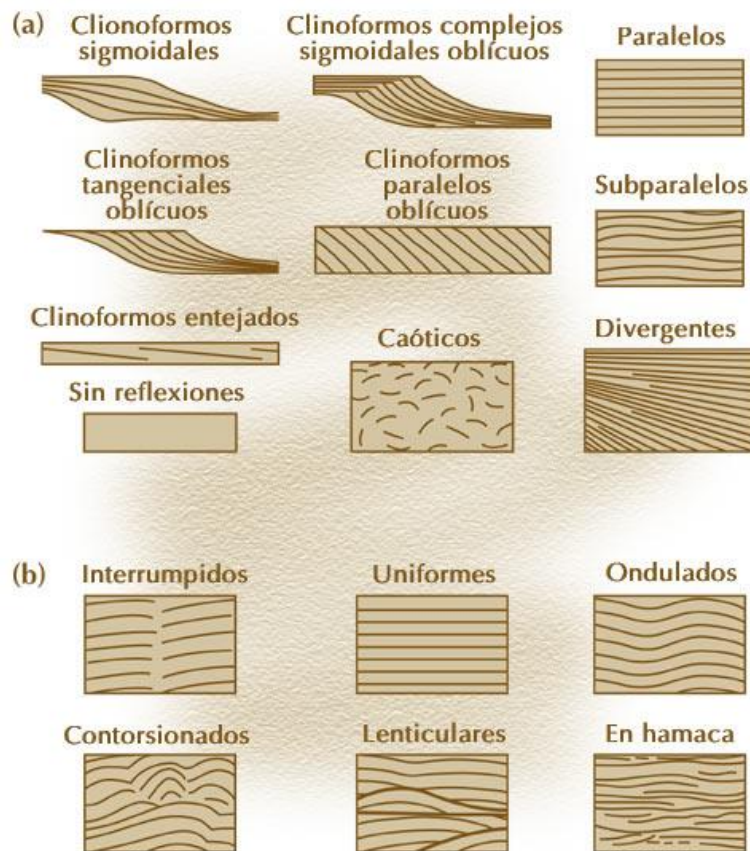
Los principales tipos de patrones de reflexión están ilustrados en la figura 30 y alguno de ellos serán discutidos a continuación:

Figura 30. Geometrías estratales y sus terminaciones



Fuente: Tomada de Catuneanu, 2002

Figura 31. Patrones de reflexión que definen las facies sísmicas. A) Clinoformas B) patrones de reflexión.



Fuente: Tomada de Catuneanu, 2002

La clinoforma sigmoidea sugiere tasas bajas de aporte de sedimentos, tasas relativamente rápidas de subsidencia y/o aumento rápido del nivel relativo del mar, típicamente este patrón se asocia a ambientes de baja energía.

El patrón enteado es un patrón progradacionales de pequeño espesor, con reflectores internos de buzamientos suave, normalmente asociados a deposición en aguas poco profundas.

El patrón oblicuo se asocia a tasas altas de aporte de sedimentos, alta energía de deposición, alta energía de deposición, baja o nula tasa de subsidencia y de nivel relativo del mar estacionario.

La configuración paralelo/subparalelo indica una tasa de deposición constante y uniforme, sobre una superficie estable o bajo condiciones de subsidencia constante.

El patrón divergente sugiere variaciones laterales en la tasa de deposición, inclinación progresiva de la superficie de deposición o la acción simultánea de estos dos factores.

La configuración caótica consiste en reflexiones discordantes y discontinuas, que indican un ambiente de alta energía y/o deformaciones sin y post depositacionales. Por otra parte, estratos intensamente deformados y litologías homogéneas no estratificadas, generalmente pueden mostrar un patrón transparente.

El patrón hummocky o hamaca, se compone de pequeños reflectores, discontinuos, irregulares, subparalelos que forman un patrón segmentado con terminaciones no sistemáticas, ese patrón está asociado a flujos gravitacionales en sistemas de abanicos submarinos.

Los patrones progradantes lo constituyen los estratos depositados sobre superficies inclinadas, cuya superposición lateral genera Clinoformas que pueden ser oblicuas (paralelas y tangenciales), sigmoideas, complejo sigmoideo oblicuo y tangencial.

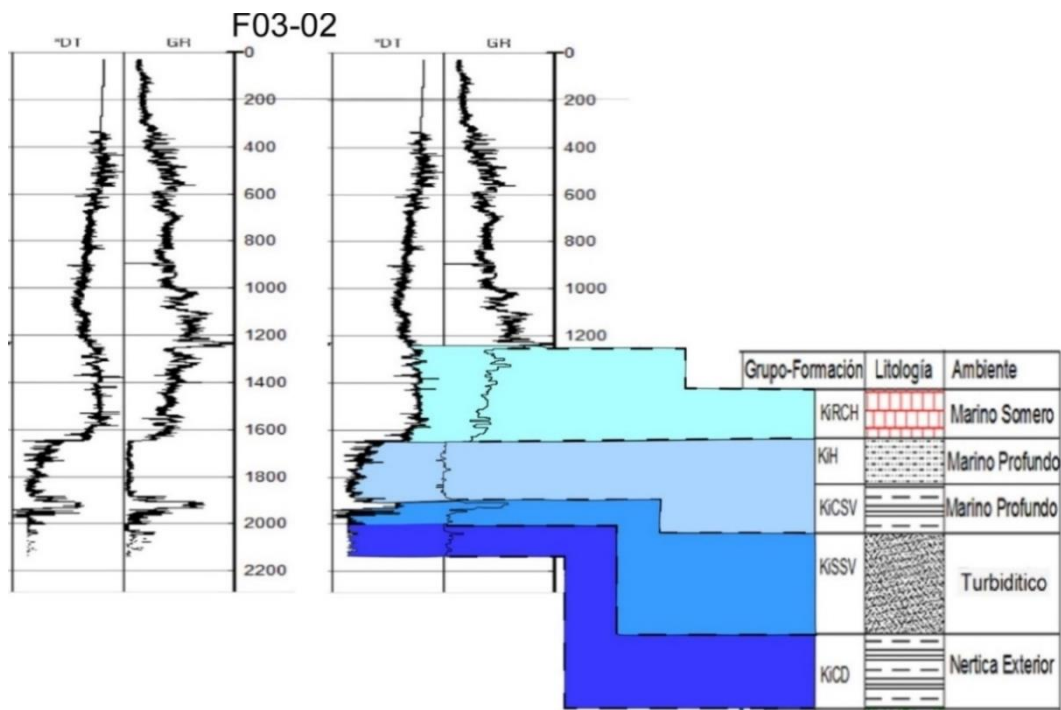
4. INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados e interpretaciones de los dos tópicos fundamentales del estudio, a saber: 1. Interpretación de electrofacies y reconstrucción de ambientes de depósitos a partir de registros de pozos y sísmica; 2. Interpretación de facies sísmicas para la determinación de modelos de estratigrafía secuencial.

4.1. INTERPRETACIÓN DE ELECTROFACIES Y AMBIENTES DE DEPÓSITOS.

En general se consideraron cuatro asociaciones de electrofacies (Ver Figuras 1,2,3,4, etc), las cuales resultan básicamente de la descripción cualitativa del tipo de trazado que exhiben las curvas en los registros de pozos, a las cuales se les asoció un ambiente depositacional a partir de modelos información litológica y sedimentaria, y modelos reportados en literatura. Ésta descripción cualitativa de las curvas se basa en la caracterización de las formas, tendencias cambios abruptos o anomalías, variaciones en la línea base, entre otros rasgos que pueden ser observables en los registros y que en el marco del método experimental son tratados con mayor profundidad.

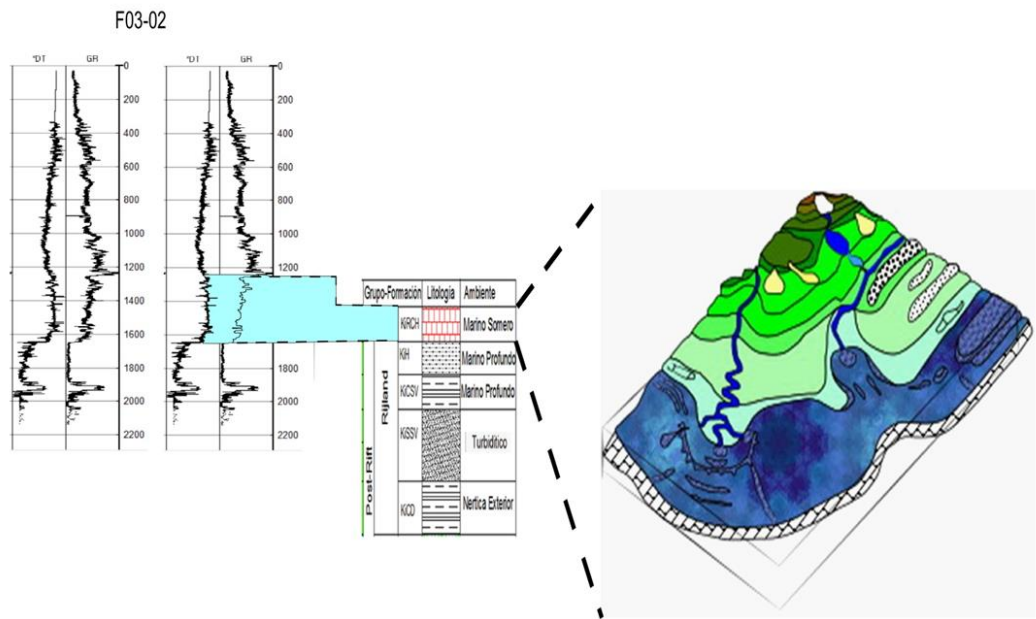
Figura 32. Distribución general de las electrofacies y su asociación con las Unidades Litológicas y su respectivo ambiente.



Fuente: autor

4.1.1. Ambiente Marino Somero

Figura 33. Relación del ambiente depositado y la formación a la que se asocia. Para esto se utilizó la imagen del bloque diagrama que representa el ambiente sedimentario.



Fuente: autor

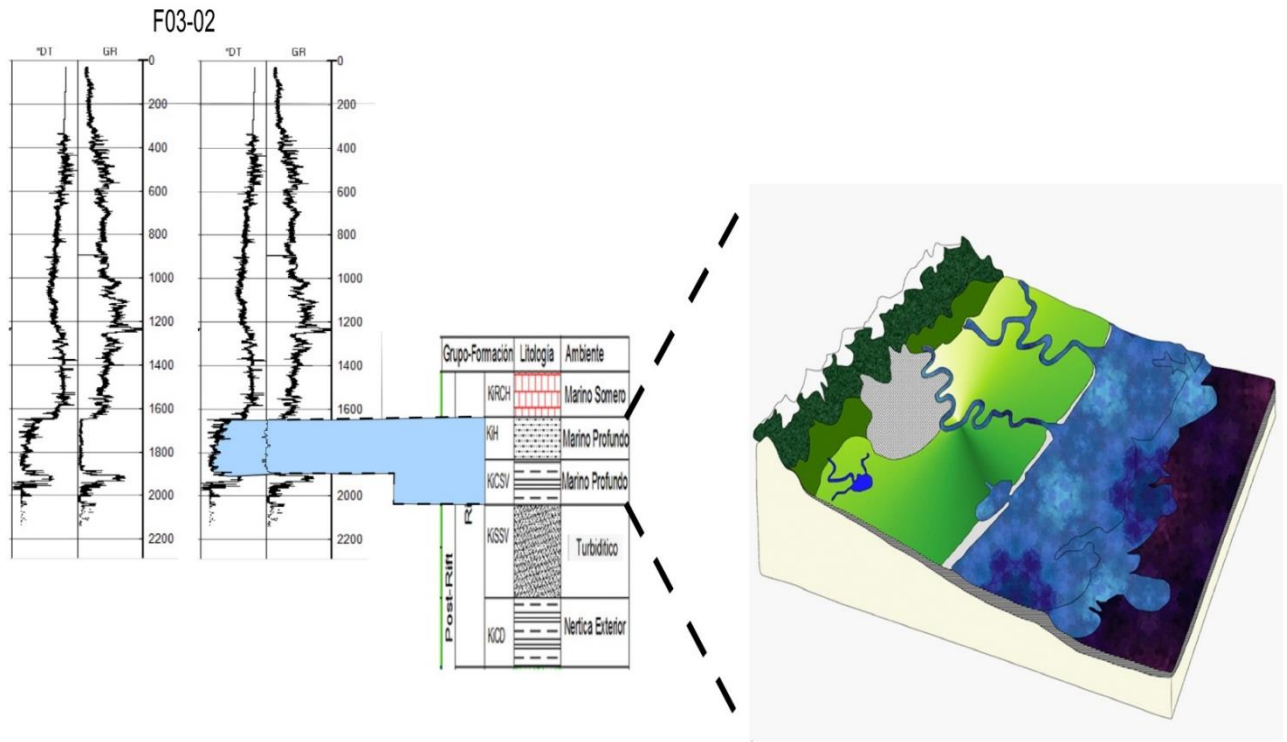
La secuencia identificada en el registro mostrada en la figura 33 está definida como tipo embudo, esta secuencia generalmente conduce a la interpretación de ambientes sedimentarios, clasificados como marino somero, banco de carbonatos o lóbulo de abanico submarino.

El contacto superior es gradacional evidenciando una secuencia FUS (Fining Upward Sequence), mientras que el inferior es abrupto. El espesor de los cuerpos de arenitas hacia el tope se hace mayor indicando el progresivo descenso en distancia entre el sitio de deposición y la desembocadura de los canales distributarios. El espesor promedio de estas electrofacies es de 400 m. Esta superposición o apilado de cuerpos con características similares constituyen una asociación de electrofacies que corresponde a un ambiente marino marginal somero o también conocido como ambiente transicional y se encuentra asociado a la Formación Chalk, ya que históricamente se ha definido como depositada en un ambiente marino somero y litológicamente se ha determinado una composición carbonítica propia de este tipo de ambientes

Este ambiente sedimentario interpretado se caracteriza por presentar alta acumulación puesto que recibe materiales terrígenos provenientes del continente y de rocas carbonatadas de restos de organismos marinos. Son muchos los factores que controlan este tipo de ambiente, como los cambios eustáticos del nivel del mar producen variaciones de profundidad y controlan la fuerza del oleaje y de las corrientes, lo cual puede provocar cambios litológicos. Además los cambios eustáticos controlan la emersión o el hundimiento de determinadas partes de la plataforma exponiéndolas o protegiéndolas de la erosión y haciendo cambiar la distribución y la extensión de los ambientes sedimentarios, que pueden llevar sedimentos terrestres a zonas anteriormente sumergidas o viceversa y regulan el nivel base de los ríos.

4.1.2. Ambiente Marino Profundo

Figura 34. Relación del ambiente depositado y la formación a la que se asocia. Para el caso se trata de un ambiente sedimentario marino profundo, el cual se asocia con las formaciones Holanda y Arcillas de Vieland respectivamente.



Fuente: autor

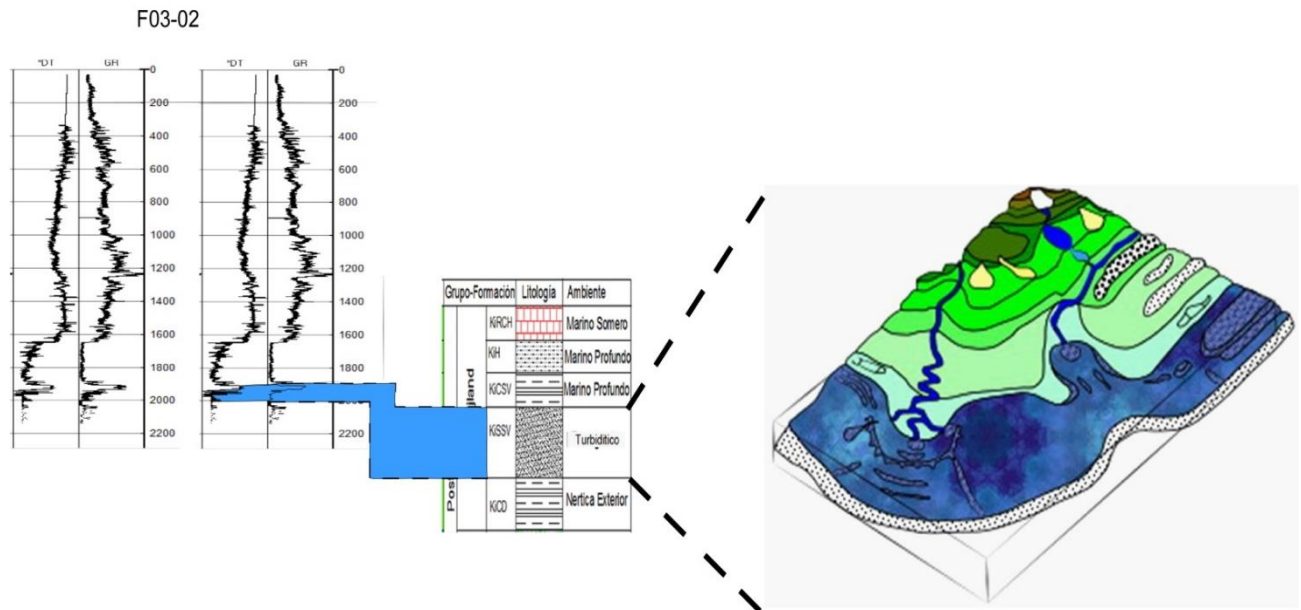
La secuencia anterior se caracteriza por presentar intercalación de cuerpos arenosos y arcillosos, representados en las variaciones en el registro de GR, el cual se muestra aserrado y formando una geometría en cilindro. Tanto el contacto superior como el inferior son abruptos. Los valores de resistividad son variables dependiendo el tipo de litología asociada, pero ocasionalmente se muestran picos que pueden ser asociados a contenido de hidrocarburos especialmente mientras más se acerque a los niveles turbidíticos inferiores. El espesor promedio de esta electrofacies comprende 300 m. La superposición o apilado de este tipo de cuerpos, constituye una sucesión de electrofacies que corresponden a un sistema de abanicos submarinos en un ambiente marino profundo.

Dentro de esta secuencia se pueden incluir las Formaciones Holanda y Arcillas de Vieland, la posición en que se encuentran ubicadas estas

formaciones determina, determinando un periodo de alta energía, donde fue sujeto a corrientes marinas.

4.1.3. Ambiente Marino Profundo (Turbidíticos)

Figura 35. La figura muestra el resultado de la interpretación, de un ambiente turbidítico, el cual es asociado con la formación Areniscas de Vieland



Fuente: autor

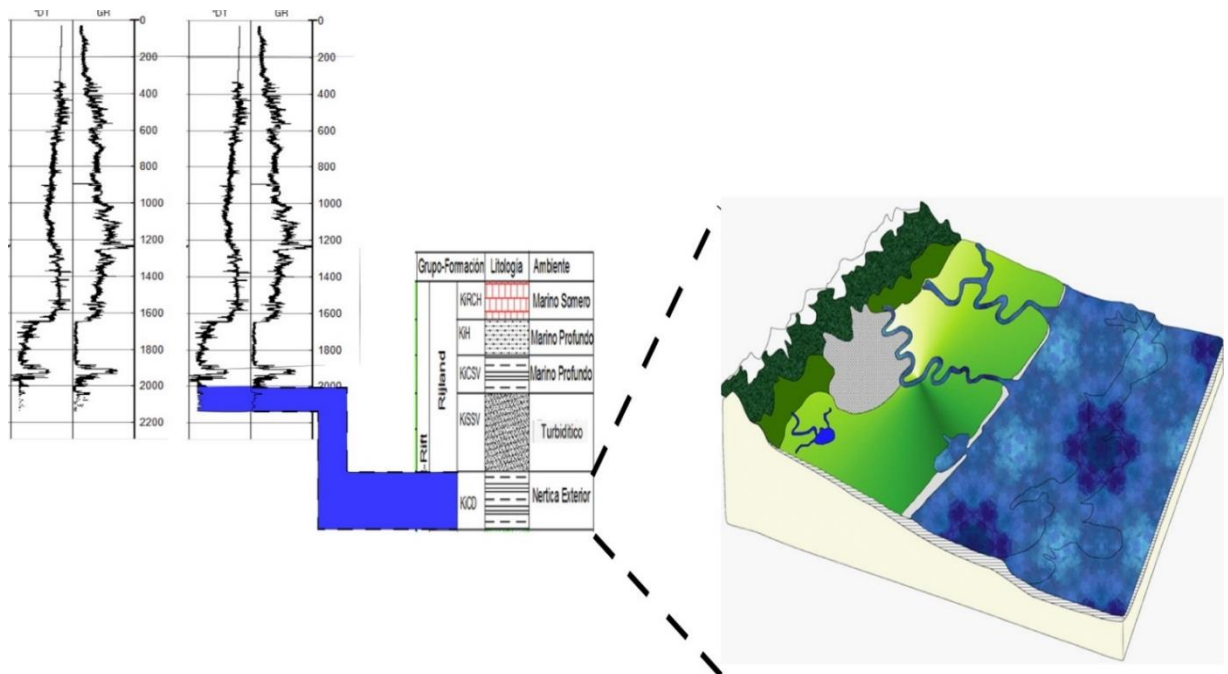
Esta secuencia se caracteriza por presentar cuerpos arenosos de granulometría variada y arcillosos en algunos segmentos, representados en las variaciones en el registro de GR, el cual se muestra aserrado y formando una geometría en embudo. Tanto el contacto superior como el inferior son abruptos. Los picos que se observan en la resistividad pueden ser asociados a contenido de hidrocarburos. El espesor promedio de esta electrofacies varía entre 50 a 120 m. La superposición o apilado de este tipo de cuerpos, constituye una sucesión de electrofacies que corresponden a un sistema de lóbulos submarinos o niveles turbidíticos que dejan de manifiesto su patrón progradante.

Una corriente de turbidez es una variedad de corrientes de densidad subacuática, que fluye como resultado de un contraste de densidad producido por los sedimentos que están turbulentamente suspendidos dentro

de la corriente. Una corriente de turbidez fluye mientras tiene carga suspendida, cuando esta se deposita deja de fluir. Esto genera unas, micro secuencias de CUS y FUS donde predomina la secuencia CUS. Partiendo de esta definición y comparándola con la literatura que describe la formación Arenas de Vieland, se puede asumir como concordante en cuanto a información.

4.1.4. Ambiente de Plataforma Externa (Nerítico Exterior)

Figura 36. La figura muestra el resultado de la interpretación, de un ambiente turbidítico, el cual es asociado con la formación Clay Deep



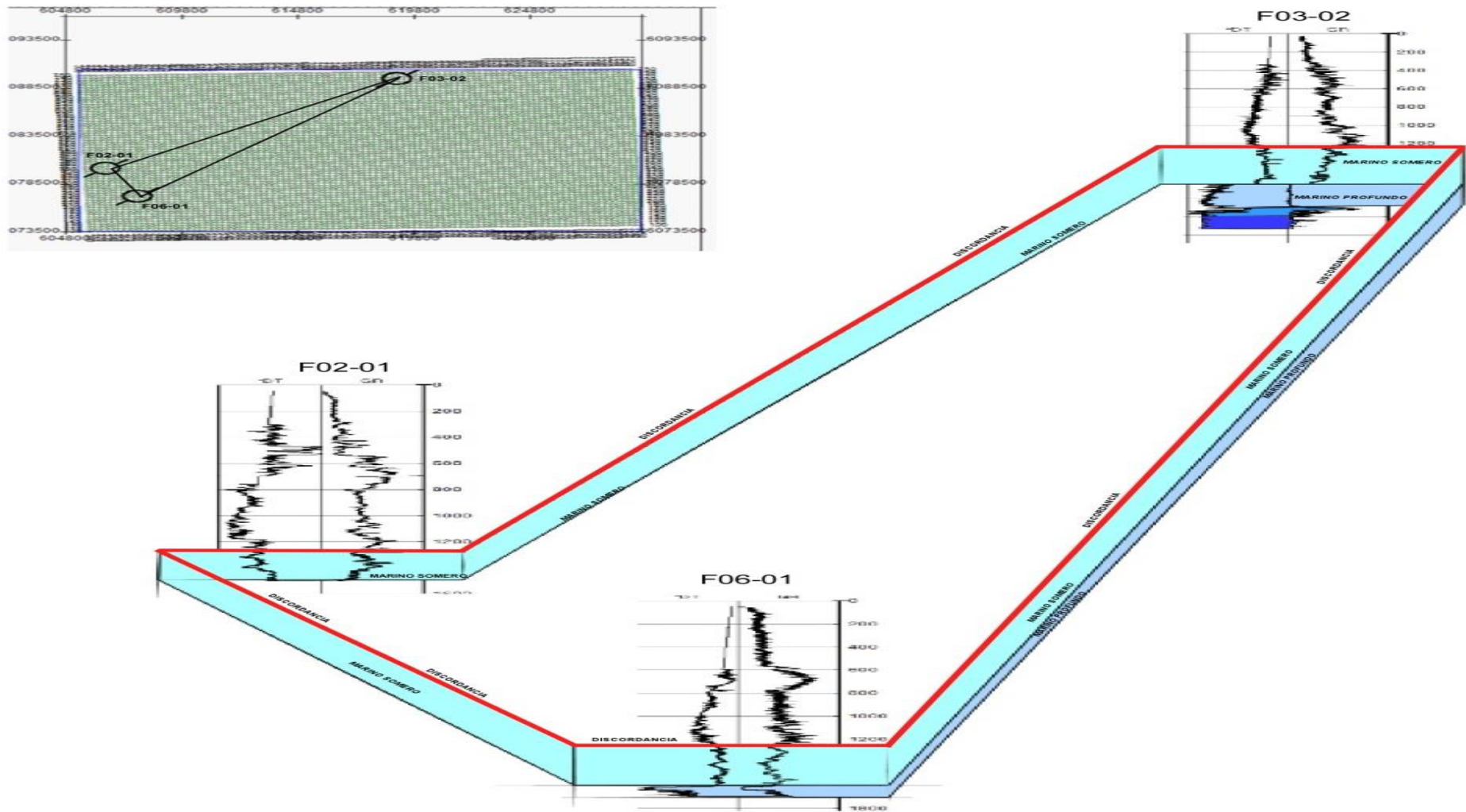
Fuente: autor

Esta secuencia se caracteriza por presentar un perfil aserrado, esta electrofacies no presenta anomalías o cambios abruptos que permitan identificar cuerpos arenosos, los valores de GR oscilan entre 90 y 100 API. Los valores asociados a la resistividad se mantienen casi constantes y tienen a disminuir hacia el tope de la secuencia. La superposición o apilado de cuerpos con características similares constituyen una sucesión de electrofacies que corresponden a un ambiente de plataforma nerítica externa también es indicador de un aumento en la profundidad, esto implica un cambio gradual en la energía del depósito, generando unas secuencias

FUS, por todo esto se ha relacionado con la Formación Arcillas Profundas o Clay Deep.

La correlación de los pozos F03-02, F02-01 y F06-01 con sus respectivos registros e interpretación de electrofacies (Ver Figura 37) muestran un aumento en la profundidad hacia NNE donde se ubica el pozo F03-02, lo anterior se evidencia en los ambientes más profundos (plataforma externa nerítica, marino profundo de abanico submarino y turbiditas) interpretados a partir de electrofacies.

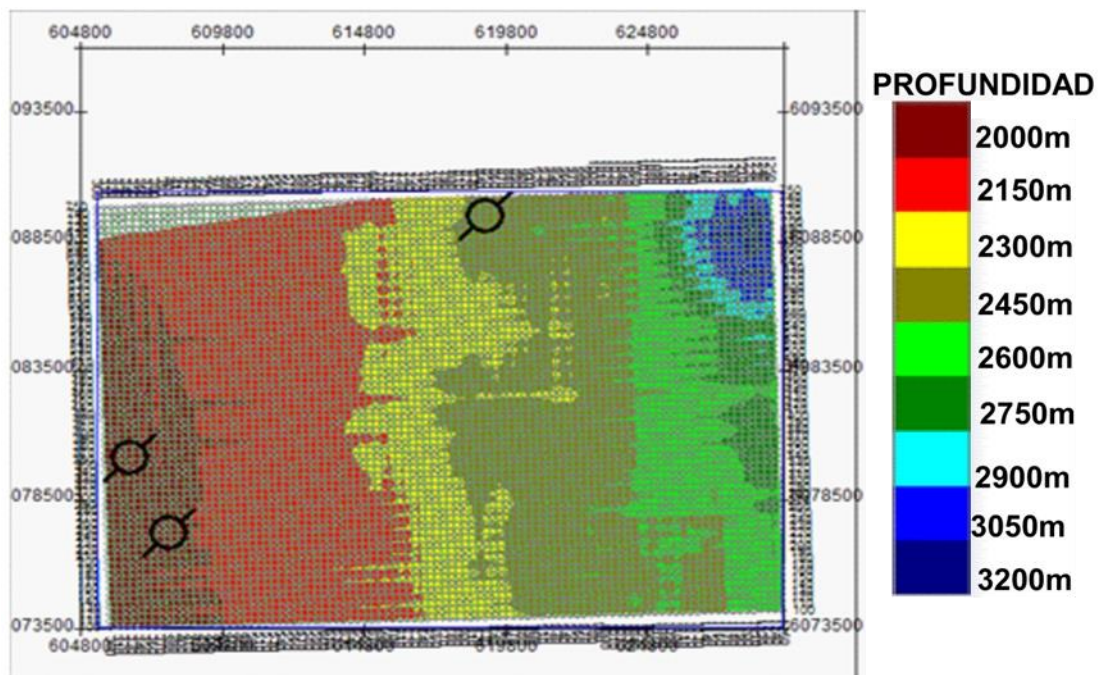
Figura 37. Interpretación de electro facies. Para este fin se utilizaron los pozos con mayor información, se muestra la correlación de los ambientes mencionados anteriormente.



Fuente: autor

En el mapa isópaco (Ver figura 38) de la base del Grupo Chalk se puede distinguir las partes de la plataforma externa en función de la profundidad, evidenciándose claramente los dominios de los ambientes anteriormente interpretados. De este modo el quiebre de la plataforma (shelf-break) se encuentra marcado por el límite del color verde y en las zonas de mayor profundidad es precisamente donde se reconocen los lóbulos de abanicos submarinos.

Figura 38. Mapa Isópaco de la base del grupo Chalk



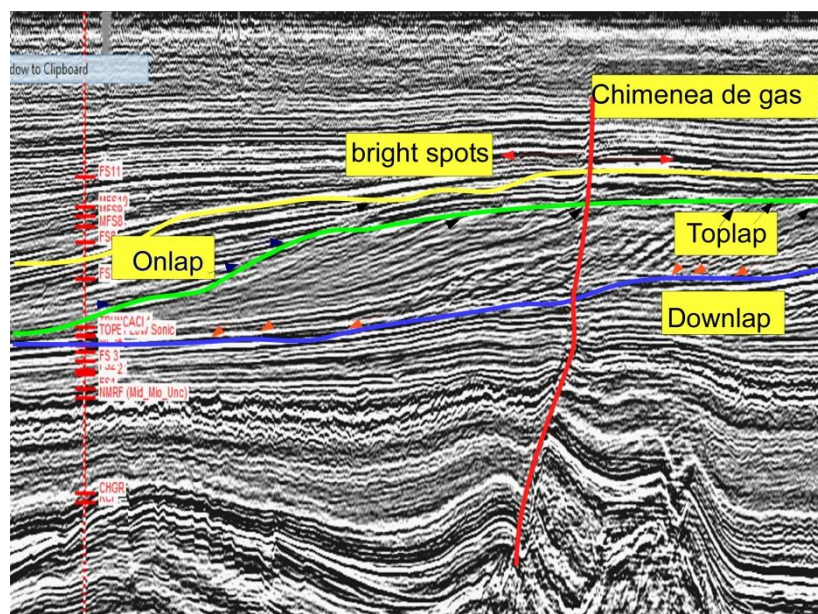
Fuente: autor

4.2. INTERPRETACIÓN DE SECUENCIAS ESTRATIGRÁFICAS

El objetivo de la interpretación consiste en sucesión siliciclástica clásica de tercer orden y se caracteriza por ser una secuencia progradante que fue depositada durante el Plioceno. El primer paso para la interpretación y definición de secuencias estratigráficas es establecer las relaciones geométricas de los reflectores sísmicos.

En el capítulo correspondiente al método experimental se detalla cada una de las definiciones de estas terminaciones estratales por tanto en este ítem sólo se abordará la interpretación de las mismas y su importancia para la interpretación de secuencias estratigráficas.

Figura 39. Interpretación de terminaciones estratales para la definición de secuencias estratigráficas



Fuente: autor

En la figura 39, se evidencia la plataforma continental de la cuenca del mar del Norte, donde se analizó un paquete deltaico compuesto por arenas y arcillas. Dentro de este paquete se puede observar estratificación sigmoidea oblicua a gran escala, típica de eventos progradantes, es importante resaltar dentro de esta secuencia sigmoidea los toplaps, onlaps, downlaps y las estructuras de truncación, algunos Bright spots también son claramente visibles, los cuales pueden ser causados por paquetes de gas biogénico

Los anteriores downlap y toplap marcan un hiato estratigráfico pero sin evidencia clara de erosión por lo tanto se puede interpretar como el cambio de una Parasecuencia retrogradacional (transgresivo) a uno agradacional (posición estable de la línea de costa). Los downlap corresponden a las superficies de máxima inundación.

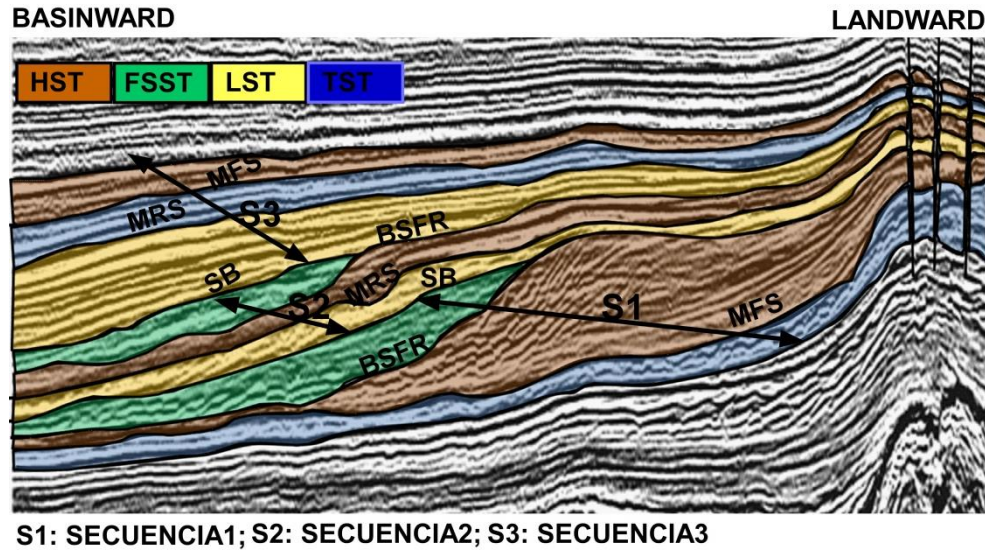
Acerca del onlap se puede decir que se encuentra marcando el inicio de una fase retrogradacional (transgresivo) contrario a los toplaps y downlaps.

4.2.1 Interpretación de Límites de secuencias y Systems Tracts.

Posteriormente a la identificación de las terminaciones estratales dentro de las facies sísmicas se procedió a definir y categorizar en sistemas depositacionales las agrupaciones de estos patrones interpretados. Se

interpretaron tres secuencias depositacionales definidas por sus discontinuidades y superficies.

Figura 40. Secuencias interpretadas con sus respectivos System Tracts.

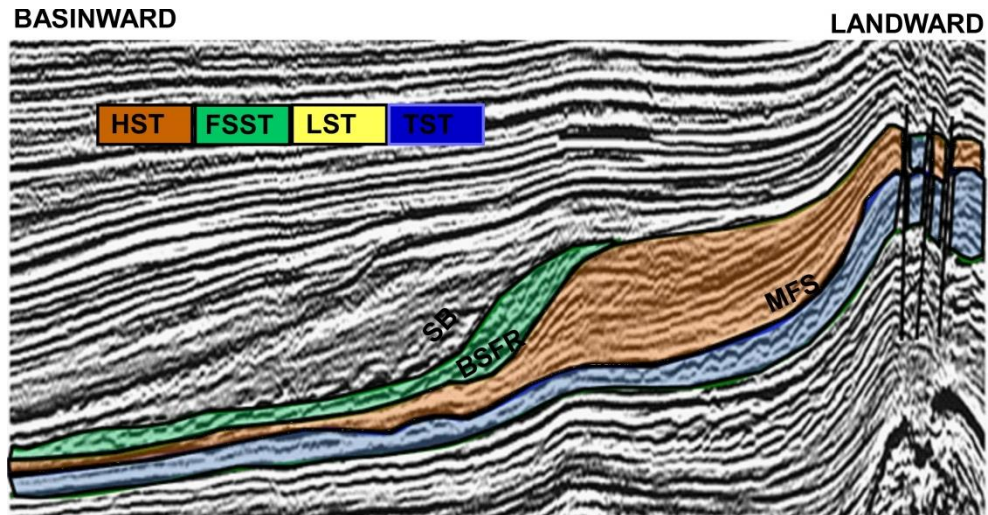


Fuente: autor

4.2.1. Secuencia 1.

Esta secuencia marca el inicio de una fase deltaica con altas ratas de sedimentación durante la regresión (HST). El levantamiento tectónico en dirección al continente causó una erosión a gran escala y por consecuencia la caída del nivel base del mar en la antepaya. Esta fase desarrolló una cuña de regresión forzada que se ha interpretado como Falling stage System tract (FST), como consecuencia de esta disminución del nivel del mar se generó una erosión marcada ocasionando la creación de discontinuidades subaereas que determinan el límite de secuencia (SB). Ver Figura 41.

Figura 41. Secuencia 1 con sus respectivos System Tracts interpretados.

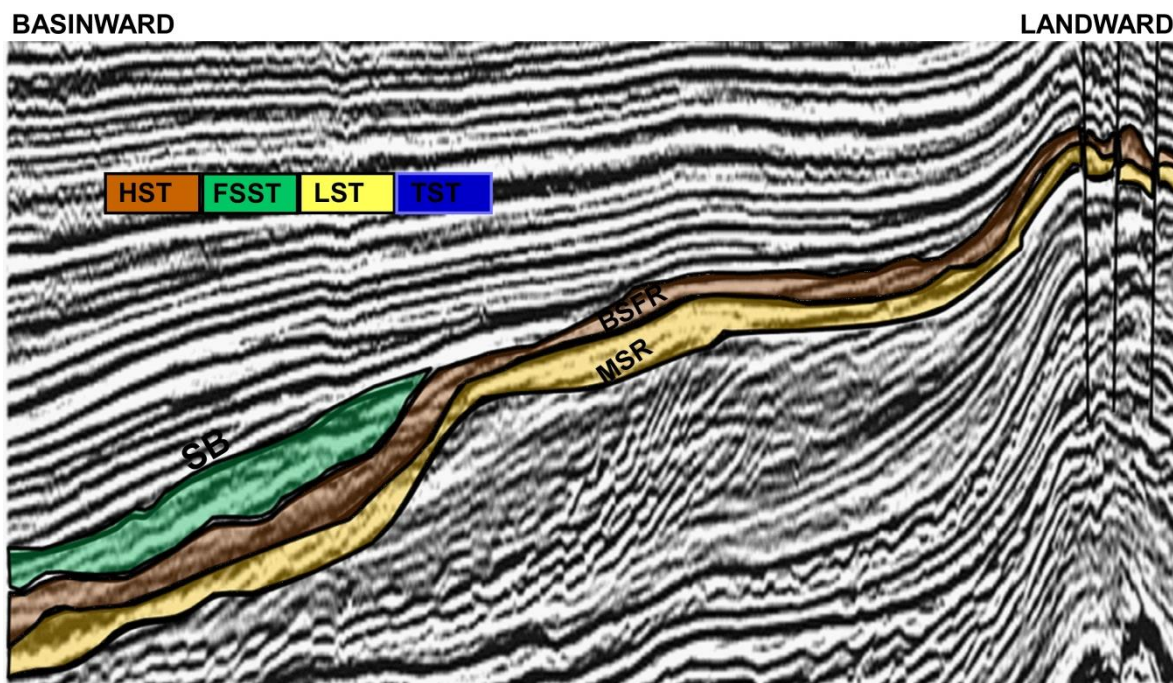


Fuente: autor

4.2.2. Secuencia 2.

La depositación de esta secuencia inicia mientras el nivel del mar aumenta de forma gradual y lentamente, se presentan tasas relativamente bajas de sedimentación comparada a la secuencia 1. Durante la etapa inicial los sedimentos regresivos llenaron el espacio de acomodación disponible y los depósitos formados durante la regresión normal pueden ser divididos en dos Systems Tracts: Lowstand system tract (LST) y el Highstand system tract (HST). Los anteriores systems Tracts están separados por la superficie de máxima regresión (MRS). Durante la depositación de la secuencia 2, el domo salino del pérmico continuaba moviéndose lentamente lo cual causó un levantamiento en las áreas circundantes. El anterior evento tectónico desencadenó una disminución del nivel del mar manifestado en la anteplaya donde otro FST fue depositado. El tope del FST es interpretado como el segundo límite de secuencia (SB)

Figura 42. Secuencia 2 con sus respectivos System Tracts interpretados.

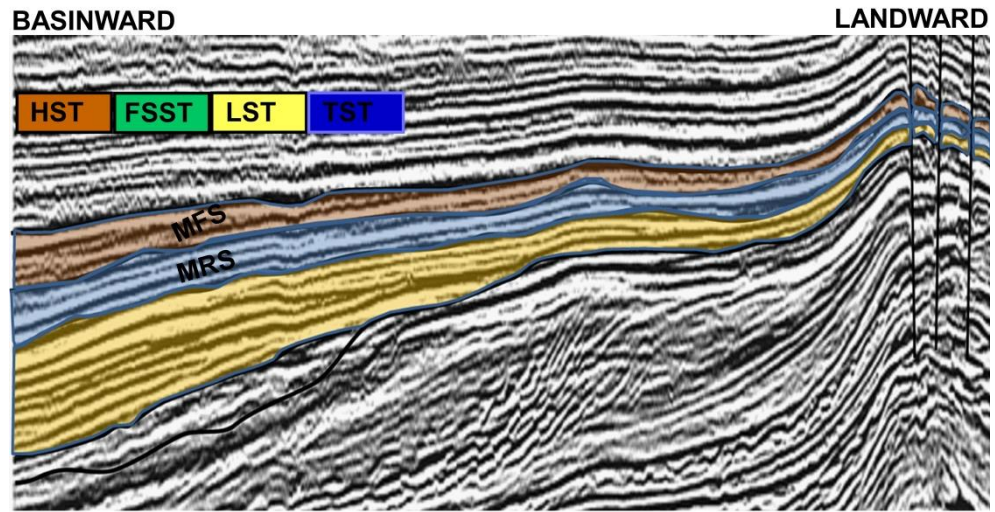


Fuente: autor

4.2.3. Secuencia 3.

Corresponde a la última secuencia interpretada y es interpretada como una fase deltaica dominada por mareas. La etapa inicial de esta secuencia es restringida hacia la parte más próxima de la cuenca y se presenta el Lowstand System Tract (LST), encima se ubica una unidad transgresiva (TST) desarrollada durante el rápido ascenso del nivel del mar. Éste rápido ascenso generó la erosión en la anteplaya, generando lo que se conoce como superficie de erosión tipo ravinement (RS). El fin de la transgresión es definida por la superficie de máxima inundación (MFS) sobre la cual se halla depositado el Highstand system tract (HST).

Figura 43. Secuencia 3 con sus respectivos System Tracts interpretados.



Fuente: autor

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la realización de un estudio completo y confiable, es indispensable contar con mayor cantidad de información, como por ejemplo el registro Laterolog (LLD), registros de Potencial Espontaneo (SP), con el fin de realizar la interpretación de una manera mas eficiente. Además de los registros también sería de gran ayuda contar con información física obtenida del área explorada.

La contribución del trabajo se encuentra en la metodología y en cuanto a teoría se refiere.

Para trabajar este tipo de software se necesita un hardware potente que permita su desarrollo a plenitud.

El uso de las nuevas tecnologías cada día es mayor en las diferentes industrias, las grandes inversiones hechas por las multinacionales se ve reflejada en la reducción de tiempo y costo, por tanto el profesional debe tratar de adquirir ciertos conocimientos en materia de software.

La bibliografía consultada y que fué relevante para este trabajo se encuentra referida y puede ser útil en la reducción de tiempo en futuros proyectos encaminados en el tema propuesto.

Se pudo realizar la interpretación de las facies, solo utilizando los registros GR y DT, obteniendo una noción de los posibles ambientes sedimentarios, los cuales fueron asociados a sus respectivas formaciones partiendo de la investigación bibliográfica que se tenía.

La realización de los sismogramas sintéticos se pudo llevar a cabo con la información obtenida de los registros Sónico (DT), de Densidad (RHOB) y Gamma Ray (GR), este último utilizado como referencia.

Uno de los pasos que resultó con mayor éxito fue la calibración de los VSP con los sismogramas sintéticos, esto permitió la realización del mapa isópaco que muestra con claridad el dominio de los ambientes sedimentarios que se definieron en la interpretación de facies.

A partir de la densidad física de rocas (utilizando la herramienta crossplots), se determinó que la densidad constituye un indicador claro de la litología;

sin embargo para uno de los objetivos del trabajo, la identificación de ambientes sedimentarios no es de gran utilidad.

El atributo de la amplitud no es determinante para la interpretación de facies sedimentarias a partir de sísmica 3D.

El mapa isópaco, muestra la base de la formación Chalk, esto se da por medio de curvas trazadas por puntos de igual espesor.

El mapa isópaco, muestra un homoclinal de suave buzamiento.

Se recomienda capacitación continua y de calidad en el uso de estas tecnologías.

BIBLIOGRAFIA

- Alfonsi, P. (1983). Ambientes Sedimentarios (Facies Clásticas), Meneven, 1983,1 – 8.
- <http://www.pdvsa.com/lexico/campos/cp049.htm>.
- Luisely P, Linares M. (2012). Caracterización mediante atributos sísmicos y registros de pozo de las arenas de los miembros jobo y morichal de la zona este del campo temblador.
- Ruiz F, (2012). Estudio de transformadas multi-atributos para la predicción de propiedades petrofísicas. Campo Oritupano, Venezuela.
- Peña Ortiz A, (2012). Análisis de atributos sísmicos para la caracterización del reservorio de la Formación Rosa blanca en el bloque El Playón, cuenca del Valle Medio del Magdalena.
- Coe, A.L. (Ed.)., 2003. The Sedimentary Record of Sea-level Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nichols, G., 2009. Sedimentology and Stratigraphy. Wiley-Blackwell 2nd. Edición.
- Galvis H, (2012). Reconstrucción paleo geográfica del cretáceo superior e implicaciones en el desarrollo de almacenadores de hidrocarburos (cuenca santos off shore, Brasil).
- Vera, J.A., 1994. Estratigrafía, principios y métodos, Editorial rueda, Madrid España 815-817p.
- Bastidas J, (2005). Generación de pseudoregistros y pseudosuperficies de propiedades petrofísicas con inversión de transformada de atributos sísmicos.
- Quilen K, (2006). Integración de atributos sísmicos con datos petrofísicos para determinar zonas prospectivas, arena L2M, área de finca.Yopales, Edo. Anzoátegui.

- Betancourt M., (2009). Análogos de registros de pozos para la correlación de secuencias estratigráficas mediante técnicas estadísticas multivariantes.
- Valencia L, (2010). Calibración de atributos sísmicos para la identificación litológica de carbonatos en el caribe colombiano.
- Araujo J, (2007). Caracterización de yacimiento en zona sur del campo mene grande a partir del uso de atributos sísmicos post apilamiento.
- Serra, O. & H. T. (1982). The contributions of loggings data to , sedimentology and stratigraphy: Society of Petroleum Engineers Journal, 22, 117-131.
- Zamora J, (2009). Interpretación sísmica estratigráfica y estructural de la Cuenca sedimentaria (cretácico-terciario) del bloque 5 y 6 del área Boyacá y bloques 1 y 2 del área Junín, faja petrolífera del Orinoco.
- Spalletti L, (2010). Evolución del margen activo de Gondwana occidental y su impacto en el registro sedimentario mesozoico de la cuenca Neuquina, república Argentina.
- Mousalli V, (2010). Interpretación de facies a través de perfiles.
- Olaya I, (2007) curso prospección sísmica de hidrocarburos.
- Opendtec web, <http://www.opendtec.org>, consultada junio de 2013.
- Seismic interpretations web, <http://www.learningace.com> , consultada junio 2014.
- SEPM Sequence Stratigraphy Web, <http://www.Sempstrata.org> , consultada febrero 2014.
- Google Maps, (recurso en línea), <http://maps.google.com> , consultada agosto de 2013.

- Dinoloket web, <http://www.dinoloket.nl>, consultada durante la fase 2 y 3